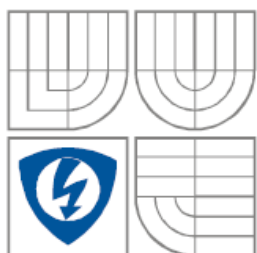




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF ASYNCHRONOUS MOTOR

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE: Msc.Ing. Mohammed Hussein Mohammed

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE: Doc. Ing. Ondrůšek Čestmír, Csc

SUPERVISOR

Brno 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ASYNCHRONNÍHO MOTORU“ vypracoval samostatně a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu disertační práce doc. Ing. Čestmírovi Ondruškovi ,Csc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé disertační práce.

V Brně dne Podpis autora

Klíčová slova

Optimalizace parametrů asynchronního motoru, matematický model motoru, simulink, MATLAB .

Key words

Optimization of the parameters of asynchronous motor, a mathematical model of motor, MATLAB- Simulink.

Abstrakt

Disertační práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část práce je zaměřena na optimalizaci parametrů náhradního obvodu asynchronního motoru pro výpočet charakteristik v ustáleném stavu:-

- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s normálním typem drážek
- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s hlubokými drážkami
- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami

Druhá část se zabývá optimalizací parametrů pro výpočet dynamických charakteristik asynchronního motoru:-

- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami.

Abstract

The doctoral thesis is divided into two main parts. The first part deals with optimization of the equivalent circuit parameters of induction motor for calculation steady state characteristics:-

- of the equivalent circuit parameters of induction motor with normal slots.
- of the equivalent circuit parameters of induction motor with deep slots.
- simulation of selected characteristics and comparison with measured values.

The second part of this work deals with optimization of the equivalent circuit parameters of induction motor for calculation of dynamic characteristics of induction motor –simulation of selected characteristics and comparison with measured values. The optimization is based on mutual comparison of measured and calculated torque-speed and current-speed characteristics.

Bibliografická citace

Mohammed H. Mohammed. Optimalizace parametrů asynchronního motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 91 s.

Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek ,Csc .

Seznam použitých symbolů

$\cos\varphi$	-	účinník
d-q	-	značení os pro Parkovu transformaci
f	Hz	frekvence
\bar{I}	A	komplexní hodnota statorového proudu (efektivní hodnota)
\bar{I}_2	A	komplexní hodnota rotorového proudu přepočteného na stator
I_0	A	efektivní hodnota proudu naprázdno
I_k	A	efektivní hodnota proudu nakrátko
I_n	A	jmenovitá hodnota statorového proudu
I_m	A	magnetizační proud
i_I	A	okamžitá hodnota statorového proudu.
i_{Ia}, i_{Ib}, i_{Ic}	A	okamžitý proud tekoucí statorovou fází a, b, c
i_A, i_B, i_C	A	okamžitý proud tekoucí rotorovou fází A, B, C
$i_{1\alpha}$	A	proud transformovaný do souřadnice α
$i_{1\beta}$	A	proud transformovaný do souřadnice β
i_{1q}	A	proud transformovaný do souřadnice q
i_{1d}	A	proud transformovaný do souřadnice d
J	kg.m ²	moment setrvačnosti
L_s	H	indukčnost statoru
L_r	H	indukčnost rotoru
$L_{s\sigma}$	H	rozptylová indukčnost jedné statorové fáze
$L_{r\sigma}$	H	rozptylová indukčnost (reaktance) jedné rotorové fáze
L_m	H	vzájemná indukčnost
M	N.m	Moment motoru bez pomocné fáze
m_z	N.m	zátěžový moment motoru
n	min ⁻¹	rychlost rotoru
P_k	W	příkon nakrátko
P_n	W	jmenovitý výkon
P_0	W	příkon naprázdno
P_1	W	příkon (elektrický)
P_2	W	výkon motoru (mechanický)

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

P_p	-	počet pólových dvojic
R_s	Ω	odpor statoru
R_r	Ω	odpor rotoru
R_c	$\Omega \cdot \text{m}$	odpor reprezentující ztráty v železe
s	[-]	skluz
t	s	čas
\bar{U}	V	komplexní hodnota statorového napětí (efektivní hodnota)
U	V	efektivní hodnota statorového napětí
$u(t)$	V	okamžitá hodnota napětí
U_0	V	efektivní hodnota napětí naprázdno
U_k	V	efektivní hodnota napětí nakrátko
U_n	V	efektivní hodnota napětí jmenovitého
u_1	V	okamžitá hodnota statorového napětí
X_s	Ω	reaktance jedné statorové fáze
X_r	Ω	reaktance jedné rotorové fáze
α	rad	mechanický prostorový úhel
α - β	-	značení os pro Clarkovu transformaci
η	%	účinnost
Ψ	Wb	spřažený magnetický tok
Ψ_s^k	Wb	komplexně sdružený prostorový vektor spřaženého magnetického toku
Ψ_r	Wb	rotorový magnetický spřažený tok
Ψ_s	Wb	statorový magnetický spřažený tok
$\Psi_{1\alpha}$	Wb	statorový magnetický spřažený tok transformovaný do souřadnice α
$\Psi_{1\beta}$	Wb	statorový magnetický spřažený tok transformovaný do souřadnice β
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	úhlová rychlost rotoru
ω_s	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	synchronní úhlová rychlost

OBSAH

STRANA

1. ÚVOD.....	12
2. PŘEHLED DOSAVADNÍHO VÝVOJE.....	14
3. FORMULACE PROBLÉMU A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ.....	17
3.1 Diferenciální evoluce [24].....	18
3.2 Princip diferenciální evoluce [24].....	19
3.2.1 META diferenciální evoluce	21
3.3 Cíle disertace.....	22
4. STATICKÉ A DYNAMICKÉ MODEL Y ASYNCHRONNÍHO MOTORU.	23
4.1 Model asynchronního motoru.....	23
5. SIMULACE MOTORU.....	32
5.1 Aplikace modelu.....	33
5.1.1 Připojení nezatíženého motoru na síť	34
5.1.2 Zkrat jedné fáze statoru v čase 2s.....	37
5.2 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru	42
5.3 Parametry zkoumaného stroje	45
5.3.1 Připojení nezatíženého motoru na síť	45
5.3.2 Zkrat jedné fáze statoru v čase 1.5s.....	48
5.3.3 Zkrat jedné fáze při 4(Nm) v čase 1.5s.....	52
5.3.4 Zkrat jedné fáze při zátěži 1(Nm) v čase 2s	58
6. OPTIMALIZACE STACIONÁRNÍCH PARAMETRŮ MOTORU POUŽITÍM	
ALGORITMU UMĚLÉ INTELIGENCE.....	65
6.1 Ekvivalentní schéma motoru	65
7. OPTIMALIZACE DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ MOTORU POUŽITÍM	
ALGORITMU UMĚLÉ INTELIGENCE.....	78
7.1 Stručný technický popis optimalizační metody.....	78
7.1.1 Odhad parametrů motoru v laboratoři	79
7.2 Proces optimalizace	81
8. ZÁVĚR.....	89
9. LITERATURA.	90

Seznam obrázků

OBRÁZEK Tab.3.2-1: Princip diferenciální evoluce [24].....	21
OBRÁZEK 3.2.1 Sin(x y) ve 3D [24].....	22
OBRÁZEK 4.1.1a) Třífázové statorové proudy v souřadnicích (α, β) pevně spojených se státorem.....	25
OBRÁZEK 4.1.1b) Třífázové vinutí statorové či rotorové.....	25
OBRÁZEK 4.2.a) Reálná a imaginární část statorového proudu v α, β souřadnicích	27
OBRÁZEK 4.2.b) Statorový proud a jeho složky v různých souřadnicích.....	27
OBRÁZEK 4.3 Hlavní a rozptylová indukčnost.....	30
OBRÁZEK 5.1 Model asynchronního motoru v simulinku	34
OBRÁZEK 5.2 Transformace souřadnic α, β do d,q	35
OBRÁZEK 5.3 Statorové napětí při momentu=39[Nm].....	36
OBRÁZEK 5.4 Statorové proudy při momentu=39[Nm].....	36
OBRÁZEK 5.5. Výřez obr 5.4 statorových proudů při momentu =39[Nm].....	37
OBRÁZEK 5.6 Rotorové proudy při momentu =39[Nm]	37
OBRÁZEK 5.7 Rychlost motoru při momentu =39[Nm]	38

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

OBRÁZEK 5.8 Frekvence rotorového napětí při momentu=39N.m	38
OBRÁZEK 5.9 Moment motoru.....	39
OBRÁZEK 5.10 Statorové napětí při přerušení jedné fáze statoru	39
OBRÁZEK 5.11 Statorové proudy při přerušení jedné fáze statoru.....	40
OBRÁZEK 5.12 Rotorové proudy při přerušení jedné fáze statoru.....	40
OBRÁZEK 5.13 Rychlost motoru při přerušení jedné fáze statoru.....	41
OBRÁZEK 5.14 Výřez křivky obr. 5.13.....	41
OBRÁZEK 5.15 Moment při zkratu jedné fáze statoru.....	42
OBRÁZEK 5.16 Výřez křivky obr.5.15 moment při zkratu jedné fáze statoru.....	42
OBRÁZEK 5.17 Statorové proudy při přerušení jedné fáze statoru při zatěžovacím momentu=20[Nm]....	43
OBRÁZEK 5.18 Frekvence napětí rotoru při přerušení jedné fáze statoru.....	43
OBRÁZEK 5.19 Výřez křivky obr.5.18.....	44
OBRÁZEK 5.20 Ekvivalentní obvod statoru asynchronního motoru.....	44
OBRÁZEK 5.21 Rotor ekvivalentního obvodu	45
OBRÁZEK 5.22 Jednofázový ekvivalentní obvod pro mnohafázový asynchronní motor.....	45
OBRÁZEK 5.23 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru.....	45
OBRÁZEK 5.24 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru.....	46
OBRÁZEK 5.25 Statorové napětí při moment=3(Nm).....	47
OBRÁZEK 5.26 Rotorové proudy při momentu=3[Nm].....	48
OBRÁZEK 5.27 Výřez obrázku statorových proudů při momentu =3[Nm].....	48
OBRÁZEK 5.28 Rychlost motoru při momentu=3[Nm].....	49
OBRÁZEK 5.29 Moment motoru.....	49
OBRÁZEK 5.30 Rotorové proudy při přerušení jedné fáze napětí.....	50
OBRÁZEK 5.31 Výřez Obr 5.30 rotorových proudů při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	50
OBRÁZEK 5.32 Statorové proudy při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	51
OBRÁZEK 5.33 Výřez obrázku 5.32 statorových proudů při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	51
OBRÁZEK 5.34 Rychlost motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	52
OBRÁZEK 5.35 Moment motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	52
OBRÁZEK 5.36 Výřez Obrázek 5.35 moment motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru.....	53
OBRÁZEK 5.37 Frekvence napětí rotoru při přerušení jedné fáze statoru.....	53
OBRÁZEK 5.38 Statorové napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 4[Nm].....	54
OBRÁZEK 5.39 Statorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 4[Nm]	54
OBRÁZEK 5.40 Statorové proudy motoru při zátěži = 4[Nm].....	55
OBRÁZEK 5.41 Statorové proudy zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm].....	55
OBRÁZEK 5.42 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm].....	56
OBRÁZEK 5.43 Rotorové proudy motoru při zátěži= 4[Nm].....	56
OBRÁZEK 5.44 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm].....	57
OBRÁZEK 5.45 Moment při zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm]	57
OBRÁZEK 5.46 Výřez obr.5.45.....	58
OBRÁZEK 5.47 Rychlost motoru při zátěži= 4[Nm].....	58
OBRÁZEK 5.48 Rychlost motoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm].....	59
OBRÁZEK 5.49 Kmitočet rotoru při zátěži= 4[Nm].....	59
OBRÁZEK 5.50 Kmitočet rotoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 4[Nm].....	60
OBRÁZEK 5.51 Statorové napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm].....	60
OBRÁZEK 5.52 Statorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 1[Nm].....	61
OBRÁZEK 5.53 Statorové proudy motoru při zátěži =1[Nm].....	61
OBRÁZEK 5.54 Statorové proudy zkratu jedné fáze motoru při zátěži =1[Nm]	62
OBRÁZEK 5.55 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 1[Nm]	62
OBRÁZEK 5.56 Rotorové proudy motoru při zátěži =1[Nm].....	63
OBRÁZEK 5.57 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze při zátěži =1[Nm]	63
OBRÁZEK 5.58 Moment při zkratu jedné fáze motoru při zátěži =1[Nm]	64
OBRÁZEK 5.59 Výřez obrázku 5.58.....	64

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

OBRÁZEK 5.60 Rychlost motoru při zátěži $=1[Nm]$	65
OBRÁZEK 5.61 Frekvence rotorového napětí motoru při zátěži $=1[Nm]$	65
OBRÁZEK 5.62 Rychlost motoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži $=1[Nm]$	66
OBRÁZEK 5.63 Frekvence rotorového napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži $=1[Nm]$	66
OBRÁZEK 6.1.1 Schema motoru(A) hlouboká drážka	67
OBRÁZEK Tab. 6.1-1 : Naměřené hodnoty motoru	67
OBRÁZEK Tab. 6.1-2: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma [A]	69
OBRÁZEK 6.1.2 Schéma motoru(B) jednoduchá	70
OBRÁZEK Tab. 6.1-3: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma [B]	72
OBRÁZEK 6.1.3 Input current magnitude(vstupní magnetizační proud) sch.A	73
OBRÁZEK 6.1.4 Input current magnitude(vstupní magnetizační proud) sch.B	73
OBRÁZEK 6.1.5 $\cos\varphi$ - sch.A	74
OBRÁZEK 6.1.6 $\cos\varphi$ sch.B	74
OBRÁZEK 6.1.7 Komplexní proud statoru sch.A	75
OBRÁZEK 6.1.8 Komplexní proud statoru sch.B	75
OBRÁZEK 6.1.9 Impedance jedné fáze motoru sch.A	76
OBRÁZEK 6.1.10 Impedance jedné fáze motoru sch.B	76
OBRÁZEK 6.1.11 Moment motoru sch.A	77
OBRÁZEK 6.1.12 Moment motoru sch.B	77
OBRÁZEK 6.1.13 Výkon motoru sch.A	78
OBRÁZEK 6.1.14 Výkon motoru sch.B	78
OBRÁZEK 6.1.15 Účinnost motoru sch.A	79
OBRÁZEK 6.1.16 Účinnost motoru sch.B	79
OBRÁZEK Tab. 7.1-1: Parametry motoru	81
OBRÁZEK 7.1.2 Rozběh motoru podle Simulinku	82
OBRÁZEK 7.2.1 Schéma optimalizovaného motoru	83
OBRÁZEK Tab. 7.2-1: Naměřené hodnoty optimalizovaného motoru	84
OBRÁZEK Tab. 7.2-2: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [99%]	85
OBRÁZEK 7.2.2 Moment optimalizovaného motoru s přesností [99%]	85
OBRÁZEK Tab. 7.2-3: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [97%]	86
OBRÁZEK 7.2.3 Moment optimalizovaného motoru s přesností [97%]	86
OBRÁZEK Tab. 7.2-4: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [95%]	87
OBRÁZEK 7.2.4 Moment optimalizovaného motoru s přesností [95%]	87
OBRÁZEK 7.2.5 Proud jedné fáze s proměnnými parametry	88
OBRÁZEK 7.2.6 Výřez obr.7.2.5	88
OBRÁZEK 7.2.7 Výřez obr.7.2.5 proud jedné fáze s proměnnými parametry v závislosti na čase	89
OBRÁZEK 7.2.8 Proud jedné fáze s konstantními parametry	89
OBRÁZEK 7.2.9 Výřez obr.7.2.8 proud jedné fáze s konstantními parametry v závislosti na čase	90
OBRÁZEK 7.2.10 Výřez obr.7.2.8 proud jedné fáze s konstantními parametry v závislosti na otáčkách	90

1. ÚVOD

Asynchronní motor je v současné průmyslové praxi nejčastěji používaným typem pohonné jednotky. Nejčastějším druhem asynchronního motoru je třífázový asynchronní motor, který pracuje na principu silového působení statorového a rotorového proudu (indukovaného ve vinutí spojeném nakrátko). Motor nakrátko má dobré vlastnosti, je z funkčního i konstrukčního hlediska jednoduchý, levný, snadno se spouští, je bezpečný, má poměrně dobrý záběrný moment a velkou přetížitelnost, jeho otáčky jsou téměř stejné při proměnlivém zatížení a potřebuje pouze jednoduchou obsluhu. Vyrábí se v širokém rozsahu výkonů: od několika wattů až do 15 MW. Dále je vhodný tam, kde je potřeba velkého záběrného momentu, používá se také v nejrůznějších aplikacích, od zcela jednoduchých až po takové, které jsou z pohledu výrobního procesu kritické. Nevýhodou motoru je jeho nečekané selhání, která může být příčinou velkých materiálních ztrát i ohrožení zdraví a životů lidí. Jak vyplývá z mnoha rozsáhlých výzkumů a šetření, asynchronní motor je celkem robustní zařízení, které pokud pracuje v ideálních podmínkách, tak je spolehlivé a nenáročné na údržbu. Avšak pracují-li asynchronní motory v průmyslovém prostředí, kde jsou jejich pracovní podmínky často velmi vzdáleny těm ideálním, dochází k jejich nečekaným poruchám.

Dnešní požadavky techniky požadují od výrobců hledání vhodných postupů, které umožňují odhalit závady motoru v nejkratším časovém intervalu, aby bylo možné předejít nečekaným selháním pohonných jednotek. V technické praxi se používají různé metody, které vycházejí zejména z analýzy vibračních měření na vhodných místech motoru. Používají se ale také metody založené na základě jiných fyzikálních veličin vhodných pro analýzu (statorových proudů, teplot nebo rozptylových magnetických toků).

Pro včasné odhalení sledovaných poruch jsou rozhodující nejen citlivost a robustnost algoritmů, ale i způsob jejich použití. Způsob periodického měření a sběru dat s využitím přenosných záznamníků dat a jejich následné zpracování off-line je v současné době nejčastěji používané a jsou pro mnoho kritických aplikací neakceptovatelné. Zároveň se při stále klesající ceně elektronických prvků nabízí velký počet možností, jak kontinuálně měřit a vyhodnocovat data a informovat uživatele o vzniklých problémech okamžitě. Začátkem procesu řešení problematiky této disertační práce jsem vytvořil matematický model asynchronního motoru popisující chování stroje při určitých podmínkách práce.

Při analýze pohonů s asynchronními motory, které jsou dynamicky nenáročné, je dostatečné uvážit jen mechanicky přechodné děje. Na druhé straně pro dynamicky náročné tyristorové elektrické pohony je třeba uvážit také elektromagnetické přechodné děje. Avšak také při zanedbání ztrát v železe a vyšších prostorových harmonických složkách magnetického toku třífázový asynchronní motor můžeme popisovat vhodnou

soustavou nelineárních diferenciálních rovnic s proměnnými koeficienty. Řešení, které se využívá buď přímým způsobem na číslicovém počítači (metodou řešení soustavy diferenciálních rovnic motoru), nebo nepřímým způsobem (transformací trojfázové soustavy na dvojfázovou soustavu). Přitom se mění soustava nelineárních diferenciálních rovnic s proměnnými koeficienty na soustavu s konstantními koeficienty, kterou můžeme pak řešit buď na číslicovém anebo na analogovém počítači. Proměnné vlastnosti motoru se výhodně zkoumají z matematických modelů určujících reálné vztahy mezi vstupními, poruchovými veličinami a výstupními veličinami této soustavy nelineárního systému. Všeobecně můžeme považovat asynchronní motor za nelineární mnoho-parametrovou neautonomní soustavu. Modelují-li matematicky pro simulaci motorového pracovního režimu je důležité určit strojové parametry předem. Každé schéma z motoru obvykle potřebují informaci o parametrech a dalších údajích (jako magnetický tok motoru), která nejsou napsána v motorových údajích, ale můžeme je vypočítat. To vše na základě běžných testů a to za účelem určit odpory a indukčnosti vinutí. Základní tři testy jsou následující:-

- a) Stejnosměrný proud byl použit pro určení jednofázového statorového odporu R_s .
- b) Test naprázdno určuje přibližnou hodnotu statorové indukčnosti a také ztráty motoru v železe, tření a i jiné ztráty kromě ztrát v mědi .
- c) Test nakrátko se používá pro určení ztrát v mědi .

Věda dokázala, že složitost problémů reálného světa s mnoha vazbami mezi objekty se neustále zvětšuje a je potřeba se s ní vyrovnat adekvátními postupy. Jedním z nich je umělá inteligence. V současné době lze vidět rychlý vývoj metod umělé inteligence. Otázka je taková, jak tyto metody můžeme využít k řešení vytčených cílů v technické praxi?. V oblasti elektrických strojů se dnes řeší různé problémy. Na některých pracovištích je velká pozornost věnována otázkám technické diagnostiky. Jako hlavní metoda k řešení problematiky této disertační práce používám jednu ze známých metod umělé inteligence, která řeší problematiku optimalizace s velkou přesností. Z důvodů jednoduchosti programování, rychlosti řešení a velké přesnosti jsem používal metodu diferenciální evoluce, která je součástí umělé inteligence.

2. PŘEHLED DOSAVADNÍHO VÝVOJE.

Vědecké články a příspěvky které zkoumají podobnou problematiku a její metoda řešení s výsledky.

[1] Článek ukazuje použití metod umělé inteligence pro adaptaci parametrů simulačního modelu, který se během simulace mění. Tyto metody jsou použité k aproximaci spojitě funkce. Použitím těchto metod je ukázáno na adaptaci parametrů simulačního modelu asynchronního stroje, který se mění vlivem jeho magnetických vlastností.

[2] Autor se věnoval optimalizaci asynchronního stroje s cílem dosažení jeho maximální účinnosti. Klasický elektromagnetický návrh stroje zdokonalil vypočítáním ztrát v železe pomocí programu pro analýzu rozložení elektromagnetického pole ANSYS. Při optimalizaci demonstroval použití několika optimalizačních metod univerzitního software MATLAB.

[3] Článek se zabývá popisem metod bezsenzorového řízení rychlosti asynchronních motorů a obsahuje též krátký popis řízení rychlosti asynchronních motorů klasickými metodami (skalární a vektorové řízení). Bezsenzorové řízení rychlosti asynchronních motorů pracuje v otevřené smyčce bez použití čidla rychlosti, což v důsledku zlevňuje náklady na celý elektrický pohon. V článku je popsáno několik metod (principů) bezsenzorového řízení rychlosti asynchronních motorů.

[4] Práce je o asynchronních motorech, dává pohled na jejich konstrukci, princip činnosti, vlastností, použití a stručně popisuje návrh třífázového indukčního motoru. V první části byl popsán nejběžnější třífázový asynchronní motor, vznik točivého magnetického pole a základní vztahy. Druhá část pojednává o asynchronních motorech pro specifické aplikace, jejich provedení a vlastnosti. Analýza zapůjčeného motoru je zkoumaná v další části. Poslední část práce věnoval možnosti zlepšení základních parametrů indukčních motorů a navržený optimalizovaný motor (optimalizace motoru).

[5] Tato práce popisuje vytvoření zpřesněného matematického modelu trakčního pohonu s asynchronním motorem malého jmenovitého napětí (28 V), který je napájen z akumulátoru. Model je pracován v programu MATLAB – Simulink a je vytvořen z několika modelů motoru, střídače a zátěže, které jsou vzájemně spojeny a doplněny a jsou vektorově řízení.

[6] Tato práce se zabývá identifikací elektrických parametrů indukčních motorů. Používá se metoda genetických algoritmů (GA) jako identifikační metoda. Je to forma umělé inteligence. Použité proměny k výpočtu elektrických parametrů jsou naměřené hodnoty statorového proudu, statorového napětí a rychlosti. Test byl prováděn na 7,5 hp indukční motor s konstantní frekvencí sítě. Identifikační parametry získané touto metodou jsou srovnány s parametry IEEE standardní testy.

[7] Příspěvek se zabývá chováním vektorově řízeného pohonu s asynchronním motorem za mezních podmínek, je-li uvažována nelinearita magnetizační indukčnosti asynchronního

motoru. Magnetizační proud je optimalizován tak, aby byl při daném momentu dosažen minimální statorový proud, což znamená, že magnetizační tok není konstantní. Stanovené meze referenčních hodnot momentu, magnetizačního proudu a d-q složek statorového proudu jsou velmi důležité pro realizaci vektorového řízení asynchronního motoru v praxi u skutečného pohonu.

[8] Práce popisuje následné modelování s implementací identifikačních metod asynchronního motoru, jejichž výpočetní algoritmus je vypočten pomocí MATLAB/Simulink. Tyto algoritmy jsou převedeny (modifikovány) tak, aby byly výpočetně zpracovány na straně digitálního signálového procesoru (DSP). Dále práce prezentovala seznámení se s vybranými metodami identifikace parametrů asynchronního motoru a ověřovala (nasimulovala) správnost těchto metod pomocí MATLAB/Simulink. Hlavním úkolem však bylo tyto identifikační metody implementovat ze Simulinku do signálového procesoru řady 56F8xxx firmy Free scale. Identifikační metody běží v rámci Simulink .

[9] Tento článek se zabývá analýzou ztrát chování indukčního stroje pro obě činnosti stroje (motor/generátor). Účel této práce je popis parametrů odpovídajícího obvodu a jejich nelineárního chování v závislosti na různých faktorech – složkách, mechanickém momentu a teplotě. V tomto článku je popis činných a jalových ztrát rotoru a statoru se specifickými parametry chování. Celá analýza probíhá v ANSYS (o FEM) programu MATLAB.

[10] Cílem této práce je měření, simulace (modelování) a verifikace přechodového stavu asynchronního stroje. Jako přechodový děj byl vybrán rozběh asynchronního stroje. Při rozběhu byly zaznamenávány hodnoty, které lze porovnat s vypočtenými hodnotami z matematického modelu.

Matematický model přechodového děje je zpracován v prostředí Simulink programového balíku MATLAB a v programu Dynast, kde model zahrnoval i nelinearitu magnetického obvodu. Oba programy umožňují dynamické řešení soustavy diferenciálních rovnic. Matematickému modelu je potřeba dodat základní parametry modelovaného stroje tj. parametry náhradního schématu tohoto stroje. Tyto parametry se získají díky měření naprázdno a nakrátko na skutečném stroji a jeho vyhodnocením. Vyhodnocení měření naprázdno a nakrátko jsou provedena pomocí programu MATLAB. Z těchto měření se určí ztráty stroje pro jmenovité (štítkové) hodnoty a tyto jsou dalším programem (algoritmem) přepočteny na parametry náhradního schématu, které vkládáme do matematického modelu jako stacionární (neměnné).

[11] Táto práca popisuje dynamické vlastnosti asynchronného motoru napájaného z frekvenčného meniča. Prvá časť práce je venovaná teoretickému rozboru soustavy frekvenčného meniča – asynchronní motor, principy skalárního a vektorového řízení a podrobnému popisu možností ovládání frekvenčného meniča. V experimentální části práce jsou porovnány dynamické vlastnosti asynchronního motoru se skalárním a vektorovým řízením s čidlem otáček a bez čidla otáček v provozu naprázdno a při skokových změnách zatížení. Dále je analyzováno chování asynchronního motoru se speciálními typy zátěží, které se mění v závislosti na otáčkách (lineární, kvadratická a navíječkou závislost $M=f(n)$ a

chování asynchronního motoru při různých způsobech řízení a sinusovém tvaru zátěže. Rovněž je sledován vliv velikosti nastavení modulační frekvence na takto tvarovanou zátěž. Závěrečná část práce se věnuje chování asynchronního motoru s frekvenčním měničem při reálné zátěži vyskytující se u dopravního stroje v textilním průmyslu. V závěru jsou vyhodnoceny a porovnány výhody a nevýhody jednotlivých způsobů řízení při sledovaných zatíženích a jsou připomenuty i další faktory, které ovlivňují dynamiku chodu střídavého pohonu.

[12] Článek je psán v době, kdy složité transistorové či tyristorové měniče vládou světu regulační techniky v oblasti řízení rychlosti asynchronních motorů, zdá se skoro rouháním tvrdit, že asynchronní stroj lze, bez ohledu na jeho technické parametry či provedení, rychlostně regulovat pouhou změnou napětí při konstantním kmitočtu napájecí sítě. Toto tvrzení ovšem platí pouze pro ventilátorovou (kvadratickou) zatěžovací charakteristiku. Na základě provedených experimentů a výpočtů vyplývá, že takto konfigurovaný pohon lze (neuvažující nízkou účinnost a značné proudy) řídit v prakticky celém rozsahu otáček a momentů.

[13] Článek se zabývá popisem a vytvořením modelů magnetických obvodů elektrických strojů (točivých i netočivých), včetně výpočtu rozložení magnetického pole v daných typech elektrických strojů pomocí metody konečných prvků v programu ANSYS.

[14] V tomto příspěvku je popsán systém pro řízení asynchronního motoru bez použití čidla polohy či otáček rotoru. V článku je také řídicí systém na principu tzv. přirozeného řízení (Natural Field Orientation - NFO). Tato metoda umožňuje určit aktuální pozici prostorového vektoru magnetického pole uvnitř motoru, což je předpoklad pro jeho vektorové řízení, pouze ze známých statorových napětí a proudů. Všechny výpočty veličin nezbytných pro otáčkuovou regulaci jsou prováděny na základě matematického modelu asynchronního stroje.

[15] Příspěvek se zabývá problematikou uplatnění části oblasti umělé inteligence, do které spadá i fuzzy logika, v oblasti řízení střídavých regulačních pohonů. Jelikož je v dnešní době kladen důraz na hospodárnost a úspory elektrické energie je v tomto příspěvku uvedena možnost zlepšení účinnosti celého regulačního pohonu při jeho chodu při nízkých zatíženích v součinnosti s jeho ustáleným stavem. V konkrétním případě se jedná o zlepšování účinnosti elektrického pohonu s vektorovým řízením.

[16] Tato práce se věnuje zkoumání řešení zmíněných problémů v dnešní době. Metoda založená na ekvivalentním obvodu modelu. Cílem této práce je také porovnání metody konečných prvků a magnetických obvodů a to, vytvořit spolehlivý model elektromagnetické součásti generátoru, které mají být schopny poskytnout analýzu magnetického pole ve všech částech. Model by měl být analyzován z dostupných počítačů v relativně krátké době.

Základní magnetický obvod může být snadno analyzován, aby bylo možné prozkoumat vlastnosti stroje. Tento model se skládá ze vzduchové mezery, statoru, rotoru a magnetických obvodů.

[17] Práce se zaměřuje na popis negativních účinků napájení z měniče frekvence na asynchronní motor a jeho klíčové uzly. Podrobně rozebírá jednotlivé degradační mechanismy, které se při změně napájení uplatní a vyvozuje jejich možný vliv na sníženou spolehlivost pohonu, tvořeného soustavou měnič-motor a případně příčinnou souvislost mezi nimi a konkrétními poruchami jednotlivých uzlů stroje. Znalost těchto souvislostí je důležitým předpokladem efektivní diagnostiky a zabraňuje jejich v současné době bohužel časté dezinterpretaci, která vede k chybné technologii oprav a v konečném důsledku i zvýšené pravděpodobnosti opakování závady. Jsou nastíněny možné konstrukční úpravy motoru vedoucí k omezení či eliminaci některých nepříznivých vlivů napájení z měniče. Na popis změn v motoru při změně napájení navazuje část, zabývající se možnostmi měření a diagnostiky motoru v takové soustavě. Většina dosud používaných diagnostických metod byla prakticky ověřena jen na strojích s klasickým napájením. Je proto proveden výběr metod použitelných pro motor napájený z měniče a tyto metody jsou zdokonaleny a prakticky ověřeny na modelech i strojích v provozu tak, aby plnily svůj hlavní účel – analýzu současného stavu stroje a predikci jeho dalšího vývoje.

[18] Tato práce dává pohled na dosavadní řešení vysokorychlostních asynchronních motorů. V textu byly uvedeny možnosti použití lištěného a masivního rotoru. S ohledem na obvodovou rychlost rotoru jsou zmíněny nejdůležitější vztahy a poznatky, které souvisí s pevností použitých materiálů a velikostí stroje. Dále jsou zmíněny předpoklady, při jejichž respektování je možné zlepšit energetickou účinnost motoru. Praktická část práce byla zaměřena na návrh, analýzu a výrobu vysokorychlostního motoru s masivním rotorem s měděnou vodivou vrstvou na povrchu, včetně simulace magnetického pole, pomocí programu využívající k výpočtu metody konečných prvků. Výsledky měření vyrobeného motoru a porovnání s vypočítanými hodnotami jsou uvedeny na konci práce.

3. FORMULACE PROBLÉMŮ A CÍLŮ JEHO ŘEŠENÍ

K řešení problematiky optimalizace parametrů jsem použil vhodný matematický model popisující vlastnosti vybraného motoru. Matematický model jsem zpracoval v Matlab-Simulinku.

3.1 Diferenciální evoluce[24]

Diferenciální evoluci řadíme k dalším novým typům algoritmů. Například jeho schéma má jistou podobu s algoritmy genetickými. Některé rysy má společné, avšak oproti genetickým algoritmům má i jisté výhody. Zde tedy výčet těchto výhod diferenciální evoluce:

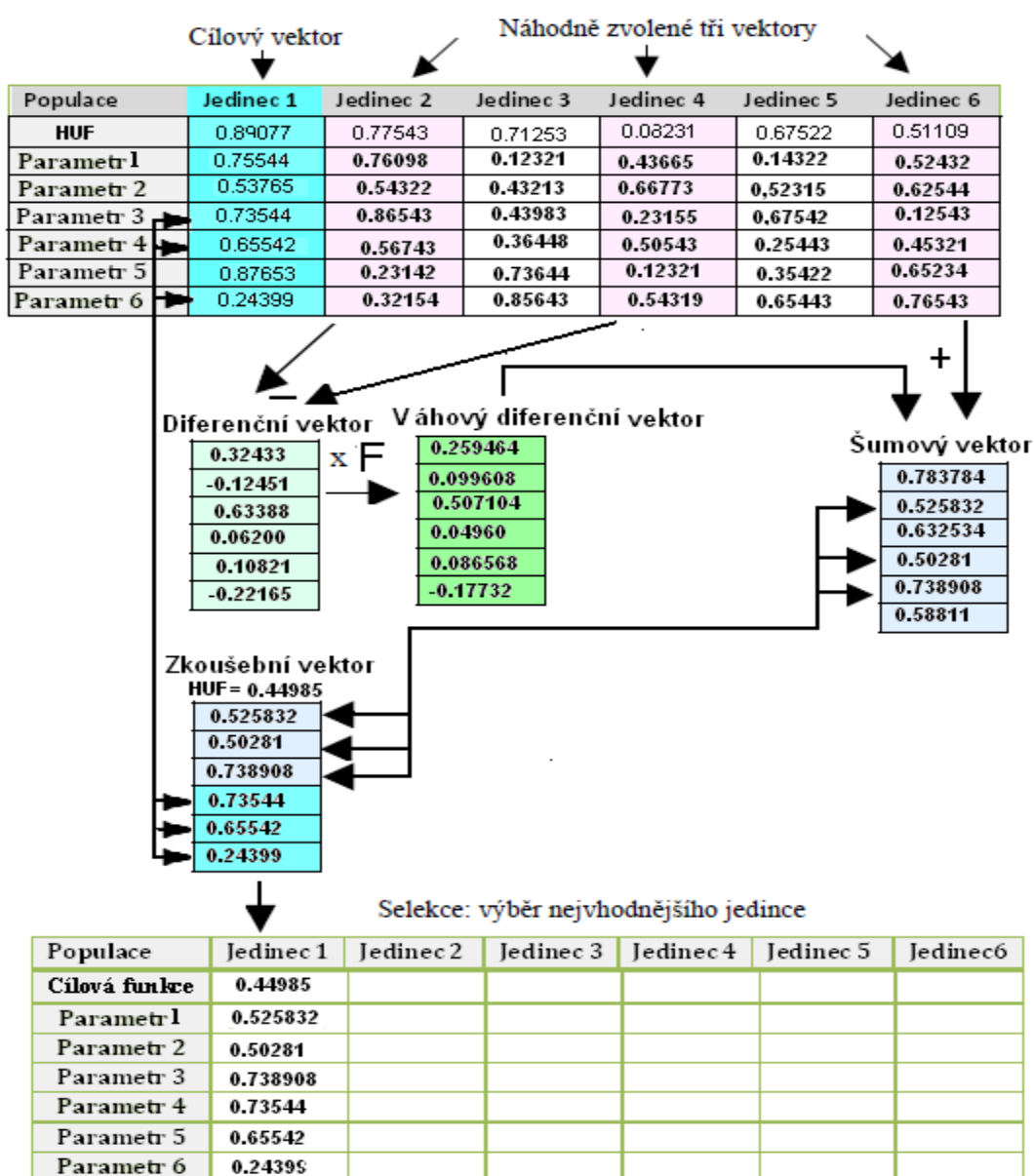
1. Tento typ algoritmu je pro svou jednoduchost možno naprogramovat kupříkladu v tabulkovém procesoru.
2. Nesčetná možnost kombinace čísel, se kterými tento algoritmus pracuje. Je možnost kombinace čísla Real, Integer, či například pouze určitou množinu čísel – např. $\{-42, 3, 5, 79, 2, 101\}$.
3. Je možné použití i dekadických čísel. Decimální hodnoty není nutné převádět do binárního kódu, jenž se u genetických algoritmů používá. Binární řetězec má omezenou délku a převedením do binárního kódu dochází ke zkreslení čísla. Dále navíc v rámci binárního zápisu mohou mutace způsobit překotnou změnu čísla s negativním dopadem na evoluci. Například číslo 16 je prezentováno 10000, číslo 17 je prezentováno 10001, takže při přechodu je vyžadována pouze mutace jediného bitu. U přechodu jiných čísel je vyžadována 100% mutace všech bitů. Zde tedy jasně dochází k nerovnoměrnosti. Tento problém se sice dá eliminovat například Grayovým kódováním, avšak práce s čísly reálnými se stále jeví jako o mnoho výhodnější.
4. Díky výše zmíněné jednoduchosti a též i možnosti použití dekadických čísel je další výhodou rychlost.
5. Genetický algoritmus kříží na základě kvality rodičů. Z tohoto důvodu pak dochází ke konvergenci do lokálního minima. Diferenciální evoluce však skoro vždy najde globální extrém, protože rodiče vybírá náhodně. O této schopnosti pak hovoříme někdy jako o diverzibilitě.
6. Některé funkce jsou v grafickém slova smyslu ploché a extrém je jen jakousi jámou v této rovině, avšak diferenciální evoluce umožňuje i zde nalezení extrému.
7. Možnost více možných řešení. Kýženým efektem sice je nalezení nejlepšího jedince, ale pokud provedeme z poslední populace výběr např. dvou nejlepších jedinců, pak je možno oba považovat za řešení. Pouze s dovětkem, že je třeba jeden výsledek nutno považovat za méně kvalitní.
8. Dále je diferenciální evoluce vhodná pro řešení nelineárních problémů s ohraničením, tedy je zde možnost naleznout extrém i u funkcí, jež jsou zatíženy nejrůznějšími vadami, jako např. multi-modalita, šum apod.

3.2 Princip diferenciální evoluce[24]

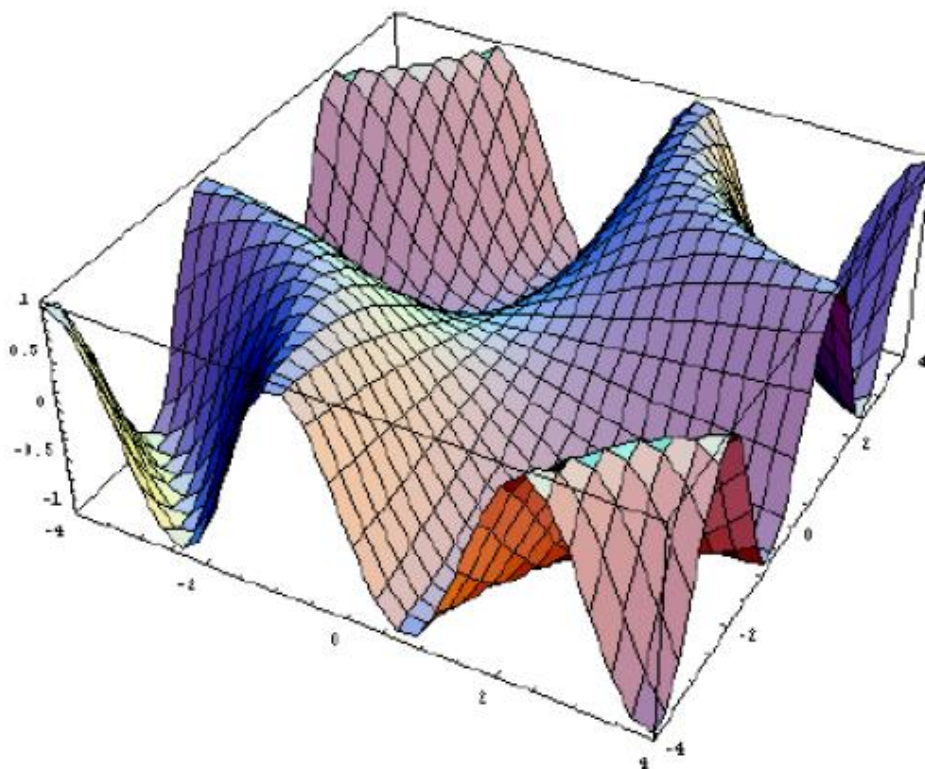
Princip diferenciální evoluce je uveden v Tab. 3.2-1.

Parametry DE - příklad		
Počet dimenzí	D	7
Velikost populace	NP	6
Mutační konstanta	F	0.8
Práh křížení	CR	0.5

Tab.3.2-1: Princip diferenciální evoluce[24]



Princip algoritmu diferenciální evoluce je takový, že se algoritmus v cyklech opakuje. Jedná se o tzv. generace, kdy jedna generace znamená jeden cyklus. Dále pracuje s tzv. populacemi. Populaci je možné si představit jako matici $N \times M$ a každý sloupcový vektor je tzv. jedinec. V tabulce 1. máme tedy populaci, jež je tvořena šesti jedinci. Jednotliví jedinci jsou složeni z konečného počtu prvků. Tyto pak s hodnotou účelové funkce dávají dimenzi probíhající konkrétní evoluce. Účelová funkce je funkcí, jež chceme minimalizovat a nalézt náležející extrém. Na Obr(3.2.2) je vyobrazena funkce $\sin(xy)$, kde její argumenty „x“ a „y“ tvoří dvourozměrný prostor, ve kterém jsou k nalezení jejich různé kombinace. Prvky „x“ a „y“ jsou jedinci o dvou parametrech, dále pak několik jedinců s různými hodnotami „x“ a „y“ tvoří z dvourozměrného prostoru populaci.



Obr.3.2.1 $\sin(xy)$ ve 3D[24]

Vyústěním diferenciální evoluce je nalezení extrému účelové funkce. Tento extrém může být jako je tomu v Obr(3.2.1) kupř. přímo funkční hodnota $\sin(xy)$. Specificky v případě této funkce je však nalezení extrému spíše pochybné, jelikož je tam mnoho totožných extrémů. Každopádně i v tomto případě by nějaký extrém diferenciální evoluce zvolila. Tedy samozřejmě presumujeme neexistenci jiného kritéria, které by výběru napomohlo. Při grafickém znázornění je potřebné přidat další dimenzi. Například 2D ve 3D jako na Obr(3.2.1). Vyšší dimenze však přinášejí problémy. V případě funkcí symetrických je

možnost projekce dvourozměrné. Tyto funkce však jsou možné ve světě matematickém a nikoliv reálném. Použití diferenciální evoluce je takřka bez limitů, protože téměř vše je převoditelné na optimalizační problém.

Celý cyklus se člení do následujících činností:

1. Základní parametry – jsou ty parametry, jež budou určovat celý průběh evoluce. Zejména se potom jedná o parametry F – váhová konstanta (0-2), CR – práh křížení (0-1), NP – počet jedinců v populaci (nejvíce se využívá metody $NP=D*10$), D – rozměr jedince (základně argumenty UF). Dalším ze základních parametrů je definice toho, z jakých čísel se budou skládat jedinci. Např. $\{(Real, -10, 15)(Integer, -1, 1)\}$. V našem případě byl jedinec dvourozměrný o dvou prvcích a jeho první prvek je Real etc.
2. Vytvoření populace – tvorba populace se provádí generováním množiny jedinců dle prototypového vektoru. Je třeba nezapomenout pracovat s prvkem navíc u každého jedince – hodnota účelové funkce, dále jen jako HUF.
3. Počátek cyklu – v průběhu každé generace probíhá ještě cyklus zabezpečující postupné evoluční šlechtění každého jedince. Postupně se tedy vybírá jeden jedinec za dalším až do konce populace a tedy generace. Pro každého z nich je prováděn evoluční cyklus.
4. Cyklus evoluce – Nejprve se zvolí náhodně tři jedinci z populace. Odečtením prvních dvou od sebe vzniká diferenční vektor. Po jeho vynásobení mutační konstantou se získá váhovaný diferenční vektor. Jeho přičtením k třetímu jedinci dostaneme šumový vektor. Dále je třeba připravit zkušební vektor. Z cílového a šumového vektoru se potom bere jeden prvek za druhým např. první z obou, druhý z obou apod., dále se každé takové dvojici generuje náhodné číslo v rozsahu 0-1 a porovnává se s konstantou CR . V případě, že je CR vyšší než toto číslo, tak se do pozice ve zkušebním vektoru dá prvek z vektoru šumového. Pokud je to naopak, tak z vektoru cílového. Dále po získu zkušebního vektoru porovnáme jeho HUF s HUF cílového vektoru. Do pozice cílového vektoru v nové populaci vybereme takového jedince, jehož HUF je lepší. V tabulce 1. Jsme hledali minimum, takže na místě cílového vektoru je vektor zkušební, což dokáže, že do nové generace se dostanou jedinci s lepší. Potom se vybere druhý jedinec, cílový vektor, a celý cyklus je opakován, dokud se nevyčerpá populace a nevznikne tedy nová generace jedinců.
5. Zhodnocení – Pokud se nevyčerpá přednastavený počet generací či HUF nedosáhne zadané hodnoty, tak se cyklus stále opakuje. V průběhu všech generací se schovává HUF nejlepšího jedince do vektoru historie. Vektor historie potom slouží znázornění průběhu celého evolučního procesu.

3.2.1 META diferenciální evoluce

je možné je během evoluce měnit dle kvality průběhu evoluce. Pokud se na její nastavení použije ona samotná, tak hovoříme o meta-diferenciální evoluci, dále již

jako METADE. Šlechtění parametrů probíhá tím způsobem, že se pro parametry provede diferenciální evoluce s použitím aktuálního jedince.

Tento META přístup je možný aplikovat i na genetické algoritmy. Tímto je možné dosáhnout lepších výsledků, avšak samozřejmě na úkor strojového času.

V případě stagnace evoluce je možné po každé generaci přidat algoritmy či v jejím průběhu změnit parametry F, CR. Obecně lze ovlivnit kvalitu i průběh následujícími prvky:

1. Nastavení konstant má přímý odraz v evoluci. Kupříkladu nižší hodnota CR může být překážkou
2. Dalším faktorem je jistě i velikost populace.
3. Kvantita je i zde důležitým faktorem, jelikož pro nalezení extrému je ideální co největší počet generací.
4. Špatná definice HUF může mít dokonce i fatální důsledek.
5. Hodnoty extrémů narůstají se vzdáleností od počátku a teoreticky končí v nekonečnu hledáním stále lepších extrémů. Je tedy záhodno případný vhodný interval určit.

3.3 Cíle disertace

1. Optimalizace parametrů náhradního obvodu asynchronního motoru pro výpočet charakteristik v ustáleném stavu

- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s normálním typem drážek
- optimalizace náhradního obvodu pro stroj s hlubokými drážkami
- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami

2. Optimalizace parametrů pro výpočet dynamických charakteristik asynchronního motoru

- simulace vybraných charakteristik a porovnání s naměřenými hodnotami.

4.STATICKÉ A DYNAMICKÉ MODELÝ ASYNCHRONNÍHO MOTORU.[19]

4.1 Model asynchronního motoru

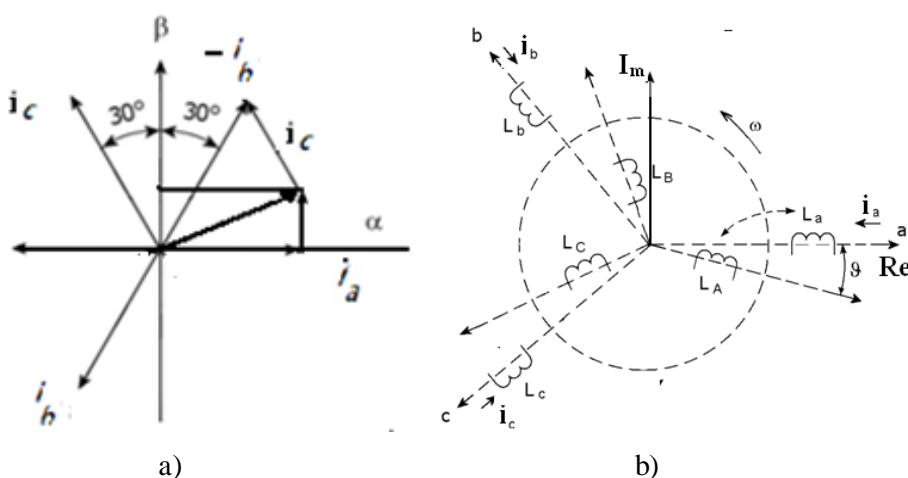
1.Prostorové Vektory a jejich lineární transformace

Dvoupólový stroj.

pro zjednodušení předpokládáme:

- a.Symetrické harmonické napájení.
- b. Rotorové veličiny jsou přepočítané ze statoru.
- c. ztráty v železe jsou zanedbány.

Vinutí motoru je třífázové s prostorovým posunem ($\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$) jak je na obrázku:



Obr. 4.1.1a.Třífázové statorové proudy v souřadnici (α, β) pevně spojených se státorem

Obr. 4.1.1b.Třífázové vinutí statorové či rotorové

Statorové proudy můžeme popsat následující rovnicí:

$$i_l = (i_{la} + i_{lb} e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{lc} e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

Rovnice(4.1) rozdělíme na reálnou a imaginární část:-

$$\bar{i}_1 = \frac{2}{3} [i_{la} + i_{lb} (\cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3}) + (i_{lc} (\cos \frac{2\pi}{3} - j \sin \frac{2\pi}{3}))] = \frac{2}{3} [i_{la} + (i_{lb} + i_{lc}) \cos \frac{2\pi}{3} + (i_{lb} - i_{lc}) \sin \frac{2\pi}{3}] \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$i_{la} + i_{lb} + i_{lc} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\bar{i}_1 = \frac{2}{3} [i_{la} (1 + \frac{j}{2}) + j(i_{lb} - i_{lc}) \frac{\sqrt{3}}{2}] \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Transformace a,b,c do α, β souřadnic.

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

$$i_{1\alpha} = i_{1a} \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} i_{1b} - \frac{1}{\sqrt{3}} i_{1c} \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

$$\sqrt{3} i_{1\beta} = i_{1b} - i_{1c} \quad \dots\dots\dots(4.8)$$

$$i_{1c} = i_{1b} - \sqrt{3} \cdot i_{1\beta} = -i_{1a} - i_{1c} - \sqrt{3} \cdot i_{1\beta} \quad \dots\dots\dots(4.9)$$

$$2i_{1c} = -i_{1a} - \sqrt{3} \cdot i_{1\beta} \quad \dots\dots\dots(4.10)$$

$$i_{1c} = -\frac{1}{2} i_{1a} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta} \quad \dots\dots\dots(4.11)$$

Stejným způsobem dostaneme

$$i_{1b} = -\frac{1}{2} i_{1a} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{1\beta} \quad \dots\dots\dots(4.12)$$

Pak matici můžeme psát v tvaru:-

$$\begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4.13)$$

Proudy $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ jsou harmonické s frekvencí ω_1 .

2)Převod třířázové souřadnice do dvouřázové

$$i_{1a} = 1 - \cos(\omega_1 t + \varphi) \quad \dots\dots\dots(4.14)$$

$$i_{1b} = 1 - \cos(\omega_1 t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) \quad \dots\dots\dots(4.15)$$

$$i_{1c} = 1 - \cos(\omega_1 t + \varphi + \frac{2\pi}{3}) \quad \dots\dots\dots(4.16)$$

Pak pro prostorové komplexní veličiny platí:-

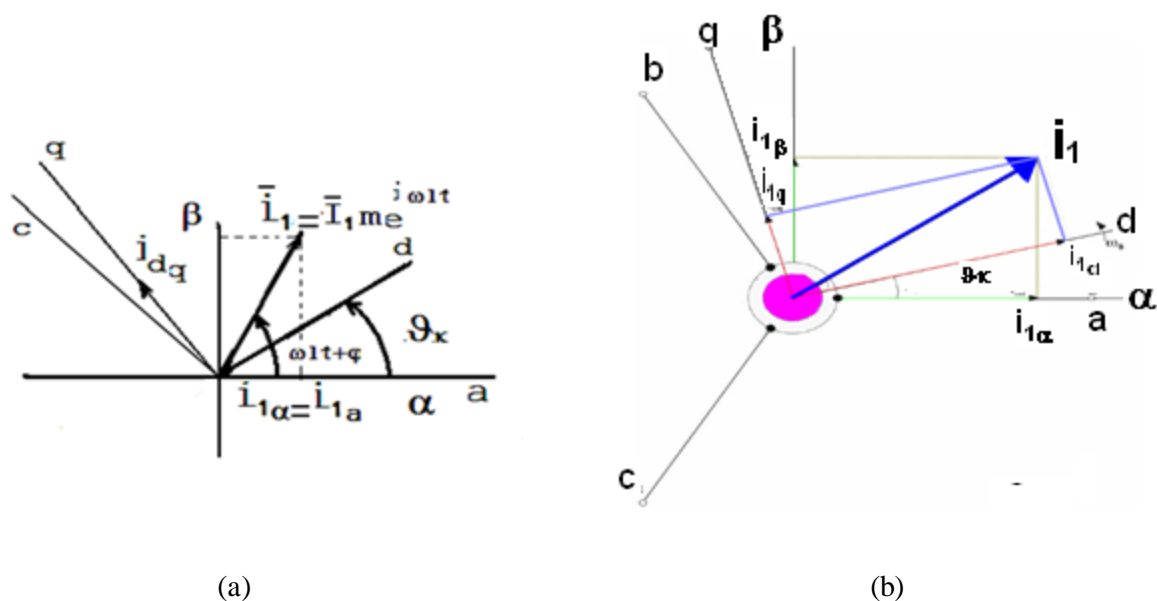
$$\begin{aligned} \bar{i}_1 &= i_{1a} + j i_{1\beta} = i_{1a} + \frac{j}{\sqrt{3}} (i_{1b} - i_{1c}) = i_{1a} + \\ & \frac{1}{\sqrt{3}} (I_m \cos(\omega_1 t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) - (I_m \cos(\omega_1 t + \varphi + \frac{2\pi}{3}))). \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4.17)$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$\bar{i}_1 = i_{1\alpha} + \frac{j}{\sqrt{s}} [I_m \cos(\omega_1 t + \varphi) \cos \frac{2\pi}{s} + 1 - I_m \sin(\omega_1 t + \varphi) \sin \frac{2\pi}{s}] \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

Po řešení dostaneme

$$\bar{i}_1 = [I_m \cos(\omega_1 t + \varphi) + j \sin(\omega_1 t + \varphi)] = 1 - e^{j(\omega_1 t + \varphi)} = \bar{I}_{1m} \cdot e^{j\omega_1 t} \quad \dots\dots\dots (4.20)$$



Obr. 4.2 a) Reálná a imaginární část statorového proudu v α, β souřadnicích pevně spojených se statorem

b) Statorový proud a jeho složky v různých souřadnicích

Točivý vektor lze vyjádřit rovněž v komplexní rovině K, která svírá s osou statoru úhel (ϑ_k) .

$$\bar{i}_1^k = \bar{I}_{1m} \cdot e^{j(\omega_1 t - \vartheta_k)} = \bar{I}_{1m} \cdot e^{j\omega_1 t} \cdot e^{-j\vartheta_k} = \bar{I}_1 \cdot e^{-j\vartheta_k} \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

$$\text{Volíme-li } \vartheta_k = \vartheta_1 = \omega_1 t \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

$$\bar{i}_1^k = \bar{I}_1 \cdot e^{-j(\omega_1 t)} = \bar{I}_{1m} \cdot e^{j\omega_1 t} \cdot e^{-j\omega_1 t} = \bar{I}_{1m} \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

Točivý vektor transformovaný do této souřadnicové soustavy se netočí a je roven fázoru \bar{I}_{1m} .

Pro transformaci z souřadnice a,b,c do d,q

$$\begin{aligned}\bar{i}_1^k &= \bar{i}_1 \cdot e^{-j\vartheta_k} = \frac{2}{3} \left(i_{1a} + i_{1b} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_{1c} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \right) \cdot e^{-j\vartheta_k} = \\ \frac{2}{3} \left(i_{1a} \cdot e^{-j\vartheta_k} + i_{1b} \cdot e^{-j(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3})} + i_{1c} \cdot e^{-j(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3})} \right) &\dots\dots\dots (4.24)\end{aligned}$$

Rozdělíme na reálnou a imaginární složku

$$e^{-j\vartheta_k} = \cos \vartheta_k - j \sin \vartheta_k \dots\dots\dots (4.25)$$

Transformace (a,b,c → d,q) souřadnic

$$\begin{aligned}\bar{i}_{1k} &= i_{1d} + j i_{1q} = \\ &= \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & \cos(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \vartheta_k & -\sin(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.26)\end{aligned}$$

3) Transformace ze souřadnice d,q do α, β souřadnice

$$\bar{i}_1^k = \bar{i}_1 \cdot e^{-j\vartheta_k} \rightarrow \bar{i}_1 = \bar{i}_1^k \cdot e^{j\vartheta_k}$$

$$\begin{aligned}\bar{i}_1 &= i_{1\alpha} + j i_{1\beta} = (i_{1d} + j i_{1q}) \cdot e^{j\vartheta_k} = (i_{1d} + j i_{1q}) \cdot (\cos \vartheta_k + j \sin \vartheta_k) = i_{1d} \cos \vartheta_k - i_{1q} \sin \vartheta_k \\ &+ j(i_{1d} \sin \vartheta_k + i_{1q} \cos \vartheta_k) \dots\dots\dots (4.27)\end{aligned}$$

$$i_{1\alpha} = i_{1d} \cos \vartheta_k - i_{1q} \sin \vartheta_k \dots\dots\dots (4.28)$$

$$i_{1\beta} = i_{1d} \sin \vartheta_k + i_{1q} \cos \vartheta_k \dots\dots\dots (4.29)$$

Transformace (d,q → α, β) souřadnic

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & -\sin \vartheta_k \\ \sin \vartheta_k & \cos \vartheta_k \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.31)$$

$$[]^{-1} = \frac{[]^T}{(\cos^2 \vartheta_k + \sin^2 \vartheta_k)} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & \sin \vartheta_k \\ -\sin \vartheta_k & \cos \vartheta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.32)$$

$$(\cos^2 \vartheta_k + \sin^2 \vartheta_k) = 1 \dots\dots\dots (4.33)$$

Transformace (d,q → a,b,c souřadnice)

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & -\sin \vartheta_k \\ \sin \vartheta_k & \cos \vartheta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_k & -\sin \vartheta_k \\ -\frac{1}{2} \cos \vartheta_k + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta_k & \frac{1}{2} \sin \vartheta_k + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta_k \\ -\frac{1}{2} \cos \vartheta_k - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta_k & \frac{1}{2} \sin \vartheta_k - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \\ \dots &\dots\dots\dots (4.34)\end{aligned}$$

$$\cos(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) = \cos\vartheta_k \cos\frac{2\pi}{3} + \sin\vartheta_k \sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} \cos\vartheta_k + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\vartheta_k \quad \dots\dots\dots (4.35)$$

$$\cos(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) = \cos\vartheta_k \cos\frac{2\pi}{3} - \sin\vartheta_k \sin\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} \cos\vartheta_k - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\vartheta_k \quad \dots\dots\dots (4.36)$$

$$-\sin(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) = -\sin\vartheta_k \cos\frac{2\pi}{3} + \cos\vartheta_k \sin\frac{2\pi}{3} = \frac{1}{2} \sin\vartheta_k + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\vartheta_k \quad \dots\dots\dots (4.37)$$

$$-\sin(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) = -\sin\vartheta_k \cos\frac{2\pi}{3} - \cos\vartheta_k \sin\frac{2\pi}{3} = \frac{1}{2} \sin\vartheta_k - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\vartheta_k \quad \dots\dots\dots (4.38)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_k & -\sin\vartheta_k \\ \cos(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.39)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_k & \cos(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\vartheta_k & -\sin(\vartheta_k - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\vartheta_k + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.40)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.41)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.42)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_k & -\sin\vartheta_k \\ \sin\vartheta_k & \cos\vartheta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.43)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta_k & \sin\vartheta_k \\ -\sin\vartheta_k & \cos\vartheta_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.44)$$

Matematický model asynchronního motoru již podmínky(1) z hodnoty rovnice platí pro souřadnou soustavu rotující rychlostí (ω_k) vůči statoru, rychlost ($\omega_k - \omega$) vůči rotoru.

Rotorové vinutí ($2p=2$), $\omega = \omega_{m\acute{e}ch}$.

Rovnice pro statorové vinutí v soustavě spojené se statorem:-

$$\bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} \quad \dots\dots\dots (4.45)$$

Pro vektor vyjádřený v rovině K rotující rychlostí (ω_k), kde $\vartheta_k = \omega_k \cdot t$ bude: -

$$\bar{u}_1^k = \bar{u}_1 \cdot e^{-j\vartheta_k} \rightarrow \bar{u}_1 = \bar{u}_1^k \cdot e^{j\vartheta_k} = \bar{u}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \quad \dots\dots\dots (4.46)$$

$$\bar{i}_1 = \bar{i}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \quad \dots\dots\dots (4.47)$$

$$\bar{\Psi} = \bar{\Psi}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \quad \dots\dots\dots (4.48)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} = \frac{d\bar{\Psi}_1^k}{dt} \cdot e^{j\omega_k t} + j\omega_k \cdot \bar{\Psi}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \quad \dots\dots\dots (4.49)$$

Po dosazení

$$\bar{u}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} = \bar{i}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \cdot R_1 \left(\frac{d\bar{\Psi}_1^k}{dt} \cdot e^{j\omega_k t} + j\omega_k \cdot \bar{\Psi}_1^k \cdot e^{j\omega_k t} \right) \quad \dots\dots\dots (4.50)$$

$$\bar{u}_1^k = \bar{i}_1^k \cdot R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1^k}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_1^k \quad \dots\dots\dots (4.51)$$

Pro rotor platí v rovině pevně spojené s rotorem (vůči statoru rychlostí ω):-

$$\bar{u}_2 = 0 = R_2 \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} \quad \dots\dots\dots (4.52)$$

Kde $\bar{\Psi}_2$ je magnetický tok spojený s vinutím rotoru.

Pro rovině K rotující rychlostí (ω_k) vůči statoru ,kde rychlost motoru vůči rotoru je

($\omega_k - \omega$) bude:-

$$\bar{i}_2^k = \bar{i}_2 \cdot e^{j(\omega_k - \omega)t} \quad \dots\dots\dots (4.53)$$

$$\bar{i}_2 = \bar{i}_2^k \cdot e^{j(\omega_k - \omega)t} \quad \dots\dots\dots (4.54)$$

$$0 = R_2 \cdot \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2^k}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2^k \quad \dots\dots\dots (4.55)$$

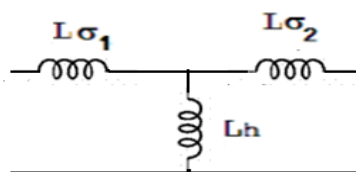
Pak rovnice pro moment bude:-

$$\omega_{mech} = \frac{\omega}{p_p}$$

$$J \cdot \frac{1}{p_p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot I_m \left\{ \bar{i}_{1k} \cdot \bar{\Psi}_1^{k*} \right\} - m_z \quad \dots\dots\dots (4.56)$$

Vztah mezi proudy a toky

$$\bar{\Psi}_1^k = L_1 \cdot \bar{i}_1^k + L_h \cdot \bar{i}_2^k \quad \dots\dots\dots (4.57)$$



Obr. 4.3 Hlavní indukčnost a rozptylová indukčnost

$$\text{kde } L_1 = L_h + L_{\sigma 1} \quad \dots\dots\dots (4.58)$$

$$L_2 = L_h + L_{\sigma 2} \quad \dots\dots\dots (4.59)$$

$L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ rozptylová indukčnost

L_h je hlavní indukčnost.

Po vhodné úpravě dostaneme

$$\bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega \cdot \bar{\Psi}_1 \quad \dots\dots\dots (4.60)$$

$$0 = R_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \bar{\Psi}_2 \quad \dots\dots\dots (4.61)$$

$$J \cdot \frac{1}{p_p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot I_m \left\{ \bar{i}_{1k} \cdot \bar{\Psi}_1^{k*} \right\} - m_z \quad \dots\dots\dots (4.62)$$

$$\bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_h \cdot \bar{i}_1 \quad \dots\dots\dots (4.63)$$

$$\bar{\Psi}_2 = L_2 \cdot \bar{i}_1 + L_h \cdot \bar{i}_2 \quad \dots\dots\dots (4.64)$$

Předpokládám, že systém je rotující synchronně s točivým polem statoru rychlostí (ω_1)

(t.j. frekvence napájecího napětí)

$$\omega_k = \omega_1 \quad \dots\dots\dots (4.65)$$

V případě roviny spojené se státorem $\alpha, \beta \rightarrow \omega_k = 0$ střídavé průběhy.

4) Model v stavových souřadnicích α, β

$\omega_k = 0$.

$$\bar{u}_1 = R_1 \bar{i}_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} \quad \dots\dots\dots (4.66)$$

$$0 = R_2 \bar{i}_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} - j\omega \bar{t} \cdot \bar{\Psi}_2 \quad \dots\dots\dots (4.67)$$

$$J \cdot \frac{1}{p_p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot I_m \left\{ \bar{i}_{1k} \cdot \bar{\Psi}_1^{k*} \right\} - m_z \quad \dots\dots\dots (4.68)$$

$$\bar{\Psi}_1 = L_1 \cdot \bar{i}_1 + L_h \cdot \bar{i}_1 \quad \dots\dots\dots (4.69)$$

$$\bar{\Psi}_2 = L_2 \cdot \bar{i}_1 + L_h \cdot \bar{i}_2 \quad \dots\dots\dots (4.70)$$

Vyloučením stavové veličiny ($\bar{i}_1, \bar{\Psi}_2$) dostaneme

$$\bar{i}_2 = \frac{1}{L_h} (\bar{\Psi}_1 - \bar{i}_1) = \frac{1}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{L_1}{L_h} \cdot \bar{i}_1 \quad \dots\dots\dots (4.71)$$

$$\bar{\Psi}_2 = L_{h2} \cdot \bar{I}_1 + \frac{L_2}{L_h} \cdot \bar{\Psi}_1 - \frac{L_1 L_2}{L_h} \cdot \bar{I}_1 = \frac{L_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 + \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot \bar{I}_1 \quad \dots\dots\dots (4.72)$$

$$0 = \frac{R_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{R_2 L_2}{L_h} \cdot \bar{I}_1 + \frac{L_2}{L_h} \cdot \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot \frac{d\bar{I}_1}{dt} - j\omega \cdot \frac{L_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot j\omega \cdot \bar{I}_1 \quad \dots (4.73)$$

Je nutno dosadit za $\frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} = \bar{U}_1$

$$0 = \frac{R_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{R_2 L_2}{L_h} \cdot \bar{I}_1 + \frac{L_2}{L_h} \cdot \bar{U}_1 + \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot \frac{d\bar{I}_1}{dt} - j\omega \cdot \frac{L_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot j\omega \cdot \bar{I}_1 \quad \dots\dots (4.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{I}_1}{dt} &= \frac{L_h}{L_h^2 - L_1 L_2} \left[\frac{R_2 L_1}{L_h} + \frac{L_2}{L_h} R_1 + \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot j\omega \right] \cdot \bar{I}_1 + \bar{\Psi}_1 \left(-\frac{R_2}{L_h} + j\omega \cdot \frac{L_2}{L_h} \right) - \\ &- \frac{L_2}{L_h} \cdot \bar{U}_1 = \frac{L_h}{L_h^2 - L_1 L_2} \left[\frac{L_2}{L_h} \left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \bar{I}_1 + \frac{L_h^2 - L_1 L_2}{L_h} \cdot j\omega \cdot \bar{I}_1 - \frac{R_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 + j\omega \cdot \frac{L_2}{L_h} \bar{\Psi}_1 - \frac{L_2}{L_h} \cdot \bar{U}_1 \right] = \\ &= \frac{L_2}{L_h^2 - L_1 L_2} \left[\left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \bar{I}_1 - \frac{R_2}{L_2} \bar{\Psi}_1 + j\omega \cdot \bar{\Psi}_1 - \bar{U}_1 \right] + j\omega \cdot \bar{I}_1 = \\ &= \frac{L_2}{-L_h^2 + L_1 L_2} \left[-\left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \bar{I}_1 + \frac{R_2}{L_2} \bar{\Psi}_1 - j\omega \cdot \bar{\Psi}_1 + \bar{U}_1 \right] + j\omega \cdot \bar{I}_1 \quad \dots\dots\dots (4.75) \end{aligned}$$

Pro stavové rovnice

$$\frac{d\bar{I}_1}{dt} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_h^2} \left[-\left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \bar{I}_1 + \frac{R_2}{L_2} \bar{\Psi}_1 - j\omega \cdot \bar{\Psi}_1 + \bar{U}_1 \right] - j\omega \cdot \bar{I}_1 \quad \dots\dots (4.76)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} = -R_1 \bar{I}_1 + \bar{U}_1 \quad \dots\dots\dots (4.77)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot I_m \left\{ \bar{I}_{1k} \cdot \bar{\Psi}_1^{k*} \right\} - m_z \quad \dots\dots\dots (4.78)$$

Do rovnic obsahujících $\bar{I}_1, \bar{\Psi}_1$ přidáme indexy α, β a dostaneme:-

$$\bar{I}_1 = i_{1\alpha} + j i_{1\beta}, \bar{\Psi}_1 = \Psi_{1\alpha} + j \Psi_{1\beta} \quad \dots\dots\dots (4.79)$$

$$\frac{d\bar{I}_{1\alpha}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_h^2} \left[-\left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\alpha} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{1\alpha} - j\omega \cdot \Psi_{1\beta} + u_{1\alpha} \right] - j\omega \cdot i_{1\beta} \quad \dots\dots\dots (4.80)$$

$$\frac{d\bar{I}_{1\beta}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_h^2} \left[-\left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\beta} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{1\beta} - j\omega \cdot \Psi_{1\alpha} + u_{1\beta} \right] - j\omega \cdot i_{1\alpha} \quad \dots\dots\dots (4.81)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_{1\alpha}}{dt} = -R_1 i_{1\alpha} + u_{1\alpha} \quad \dots\dots\dots (4.82)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_{1\beta}}{dt} = -R_1 i_{1\beta} + u_{1\beta} \quad \dots\dots (4.83)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_p}{J} \left[\frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (i_{1\beta} \cdot \Psi_{1\alpha} - \Psi_{1\beta} \cdot i_{1\alpha}) - m_z \right] \quad \dots\dots\dots (4.84)$$

Matematický Model Asynchronního Motoru

$$\frac{d\vec{i}_{1\alpha}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_m^2} \left[- \left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\alpha} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{1\alpha} - j\omega \cdot \Psi_{1\beta} + u_{1\alpha} \right] - j\omega \cdot i_{1\beta}$$

$$\frac{d\vec{i}_{1\beta}}{dt} = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_m^2} \left[- \left(R_1 + R_2 \frac{L_1}{L_2} \right) \cdot i_{1\beta} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{1\beta} - j\omega \cdot \Psi_{1\alpha} + u_{1\beta} \right] - j\omega \cdot i_{1\alpha}$$

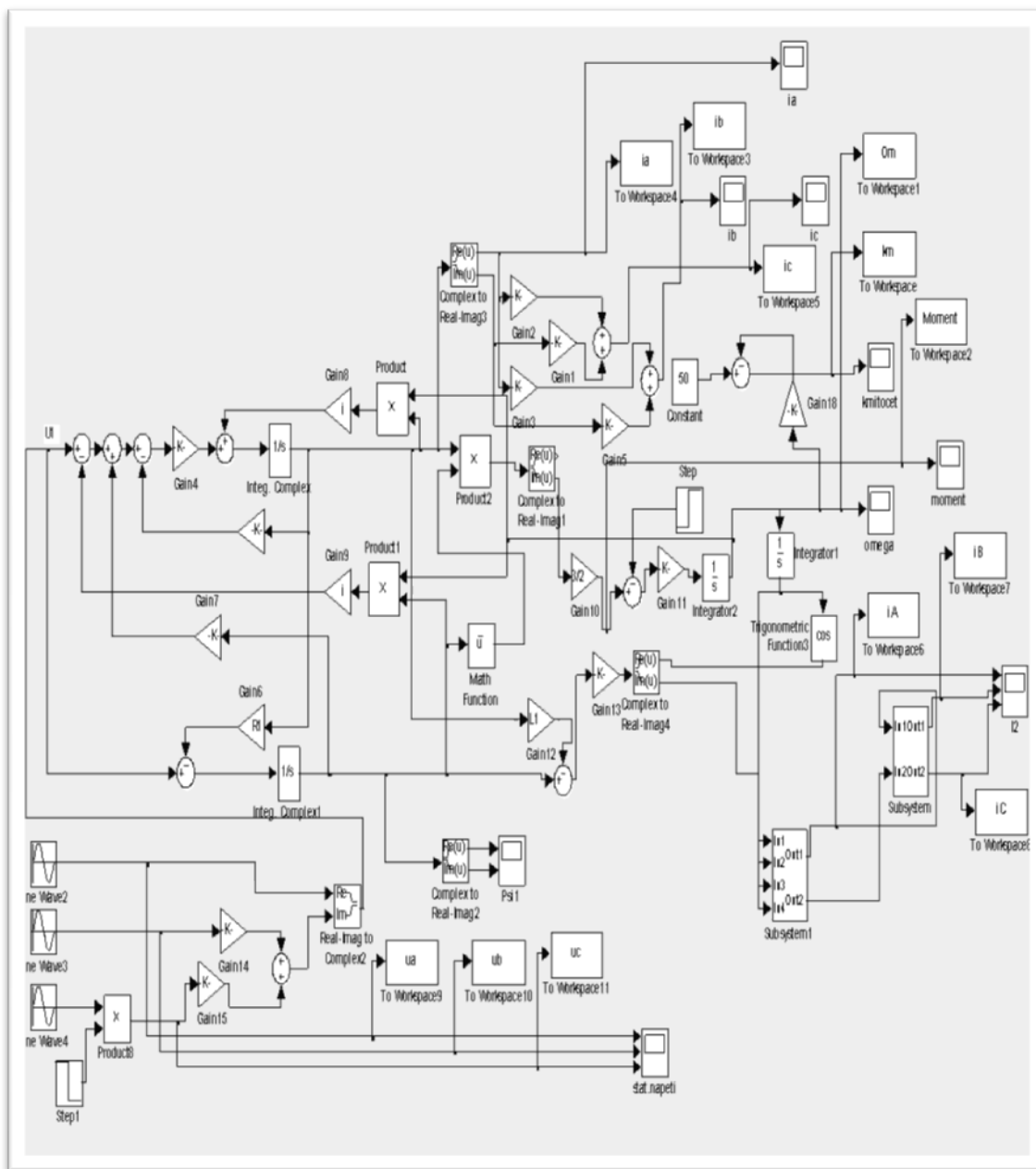
$$\frac{d\vec{\Psi}_{1\alpha}}{dt} = -R_1 i_{1\alpha} + u_{1\alpha}$$

$$\frac{d\vec{\Psi}_{1\beta}}{dt} = -R_1 i_{1\beta} + u_{1\beta}$$

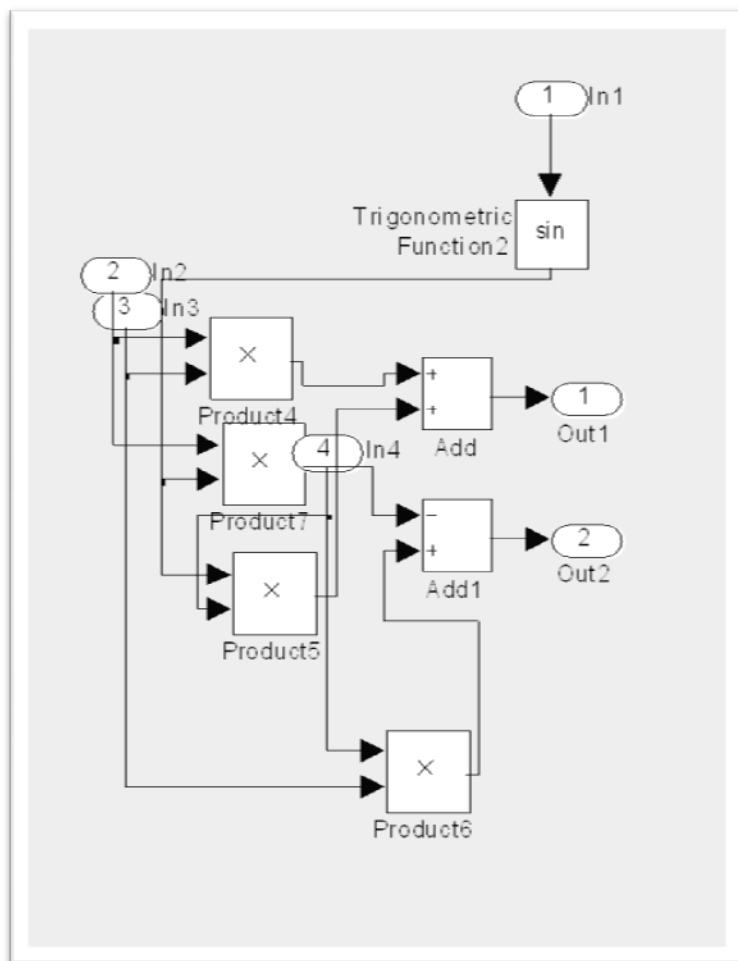
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p_p}{J} \left[\frac{3}{2} \cdot p_p \cdot (i_{1\beta} \cdot \Psi_{1\alpha} - \Psi_{1\beta} \cdot i_{1\alpha}) - m_z \right]$$

5. SIMULACE MOTORU.

Matematický model Asynchronního motoru jsem pracoval v MATLAB simu linku, aby byl jádro řešení problematiky disertační práci. Jako první část práci Simulink řešil parametry motoru graficky podle různých podmínek režimu práce motoru. Model asynchronního motoru v simulinku je na obr(5.1).



Obr5. 1 Model asynchronního motoru v simu linku



Obr. 5.2 Transformace souřadnic α, β do d, q

5.1 Aplikace modelu

Asynchronní motor typu AOM160M2

$P_n = 12 \text{ kW}$, $n_n = 2930 \text{ min}^{-1}$, $p_p = 1$, $f_n = 50 \text{ Hz}$, $M_n = 39.2 \text{ Nm}$, $J_m = 0,0433 \text{ kgm}^2$

$U_{sn} = 380/220 \text{ V}$

efektivní hodnota – motor zapojen do hvězdy

$I_{sn} = 21 \text{ A}$

efektivní hodnota jmenovitého fázového proudu

$R_s = 0,22 \Omega$

odpor fáze statoru

$R_r = 0,22 \Omega$

odpor rotorové fáze

$L_h = 0,109 \text{ H}$

hlavní (magnetizační) indukčnost

$L_{\sigma s} = L_1 = 1.646 \text{ mH}$

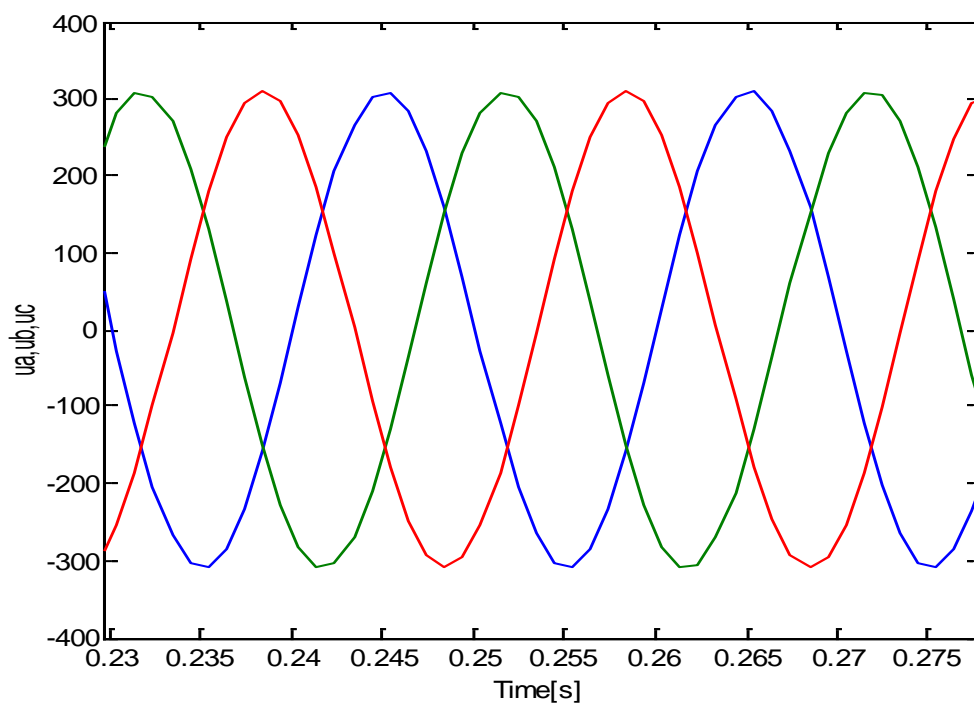
rozptylová indukčnost fáze statoru

$L_{\sigma r} = L_2 = 3.78 \text{ mH}$

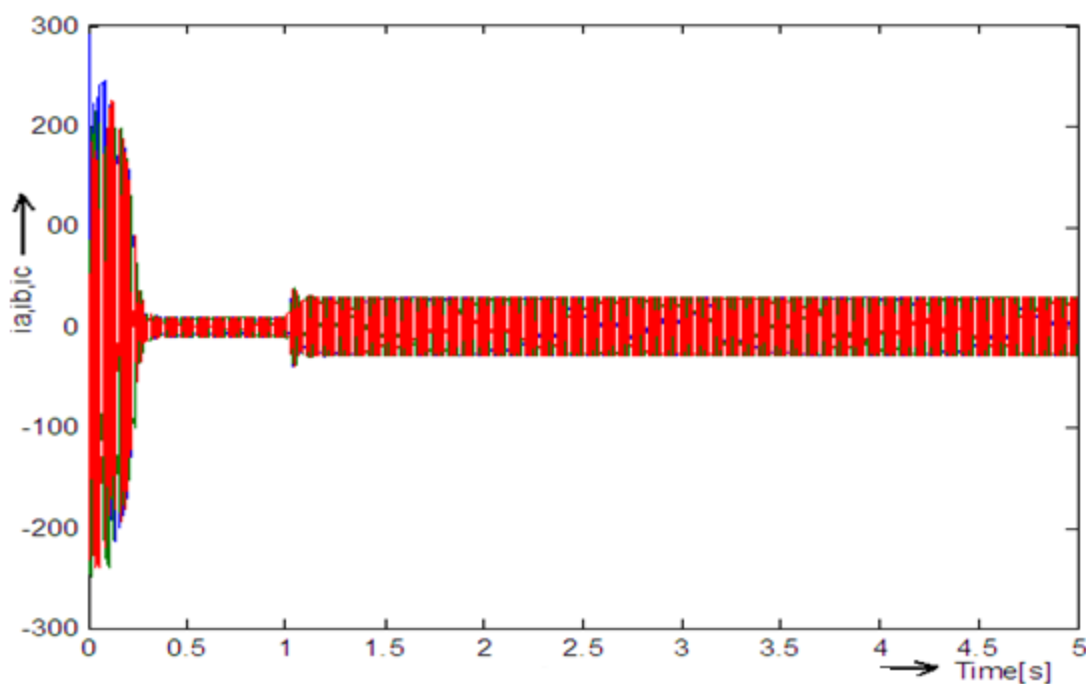
rozptylová indukčnost fáze rotoru

L_1 , indukčnost fáze statoru, L_2 indukčnost fáze rotoru

5.1.1 Připojení nezatíženého motoru na síť

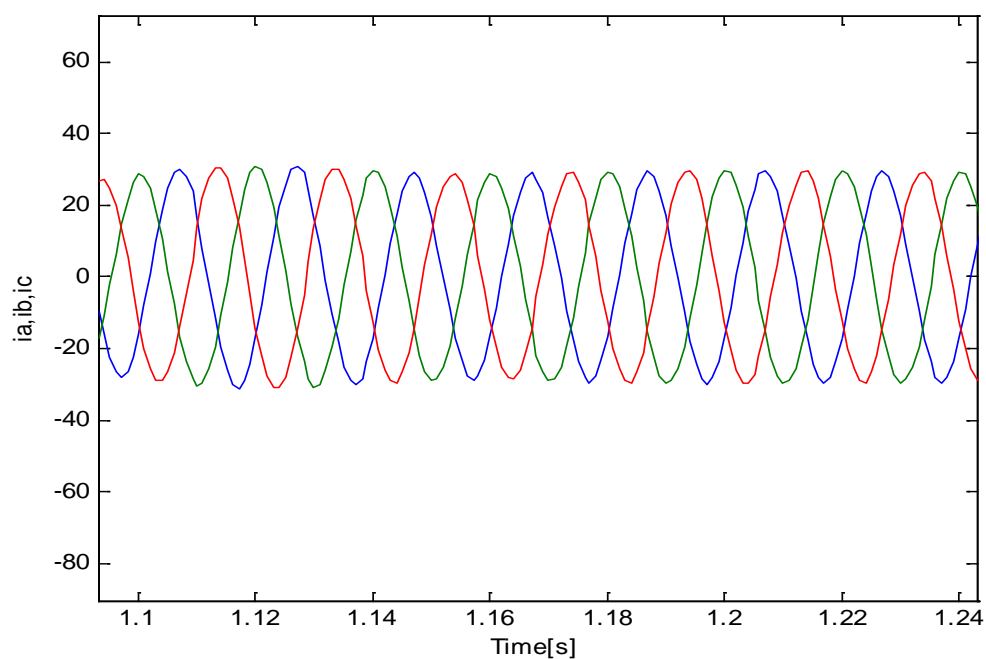


Obr.5.3 Statorové napětí při momentu =39[N.m]

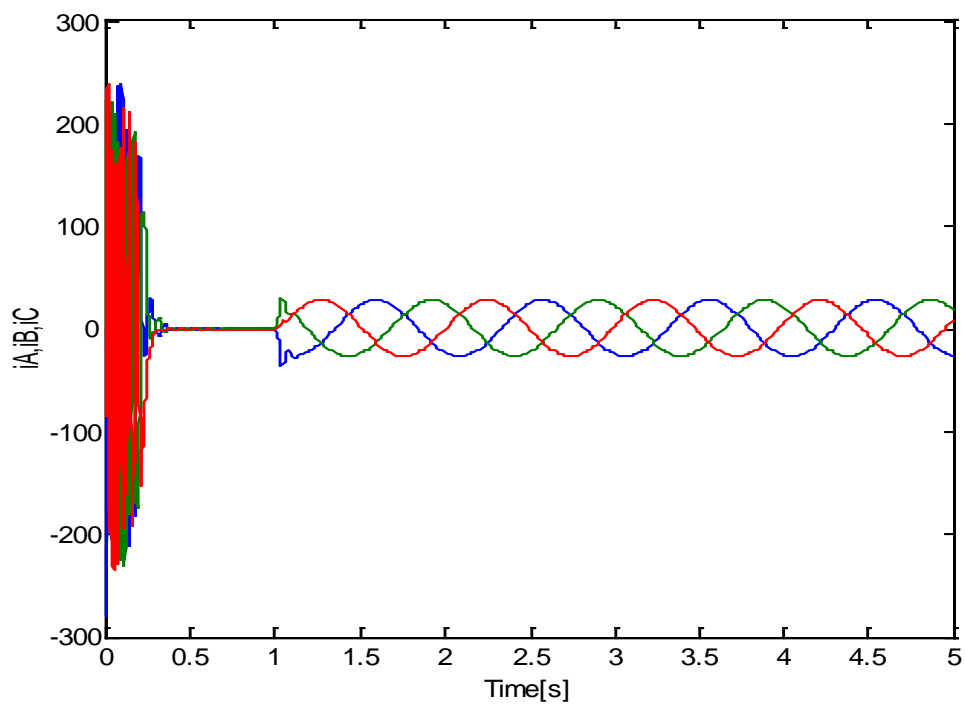


Obr.5.4 Statorové proudy při momentu =39[N.m]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

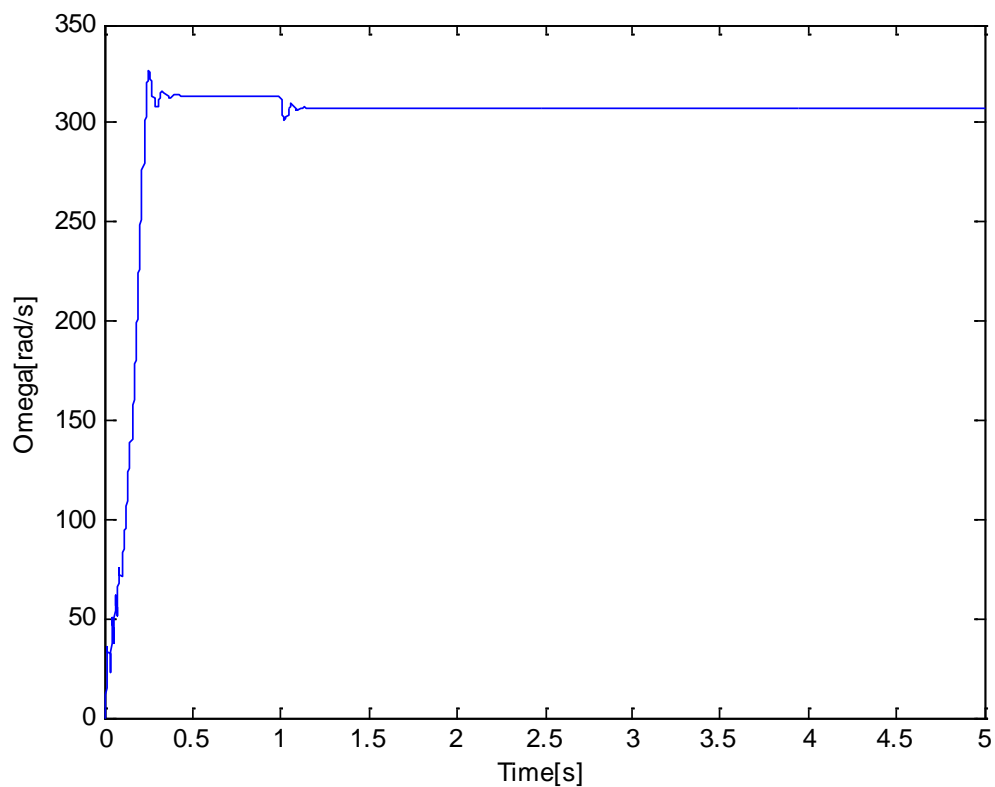


Obr5.5. Výřez obr 5.4 statorových proudů při momentu =39[N.m]

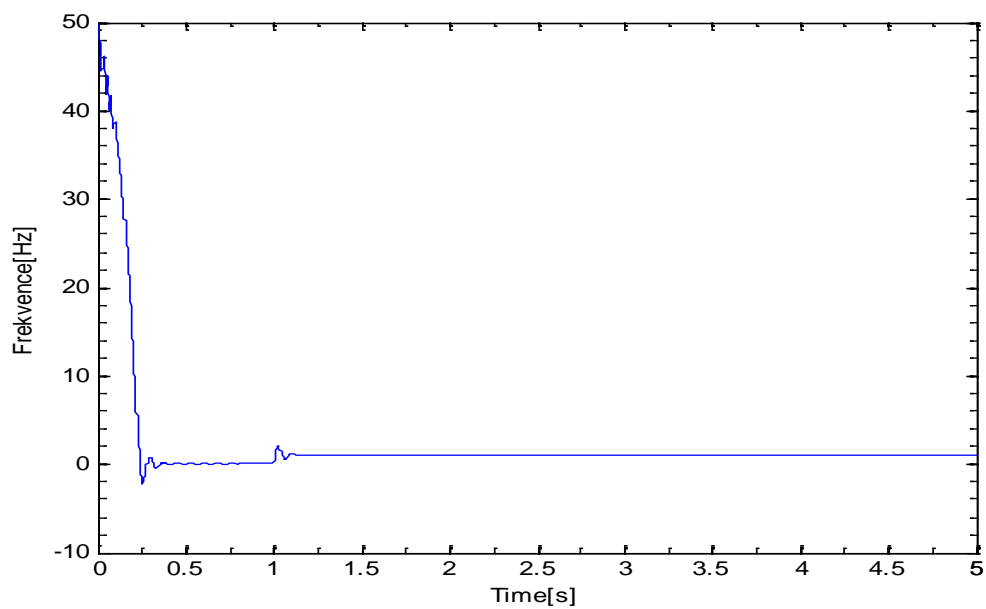


Obr. 5.6 Rotorové proudy při momentu=39[N.m]

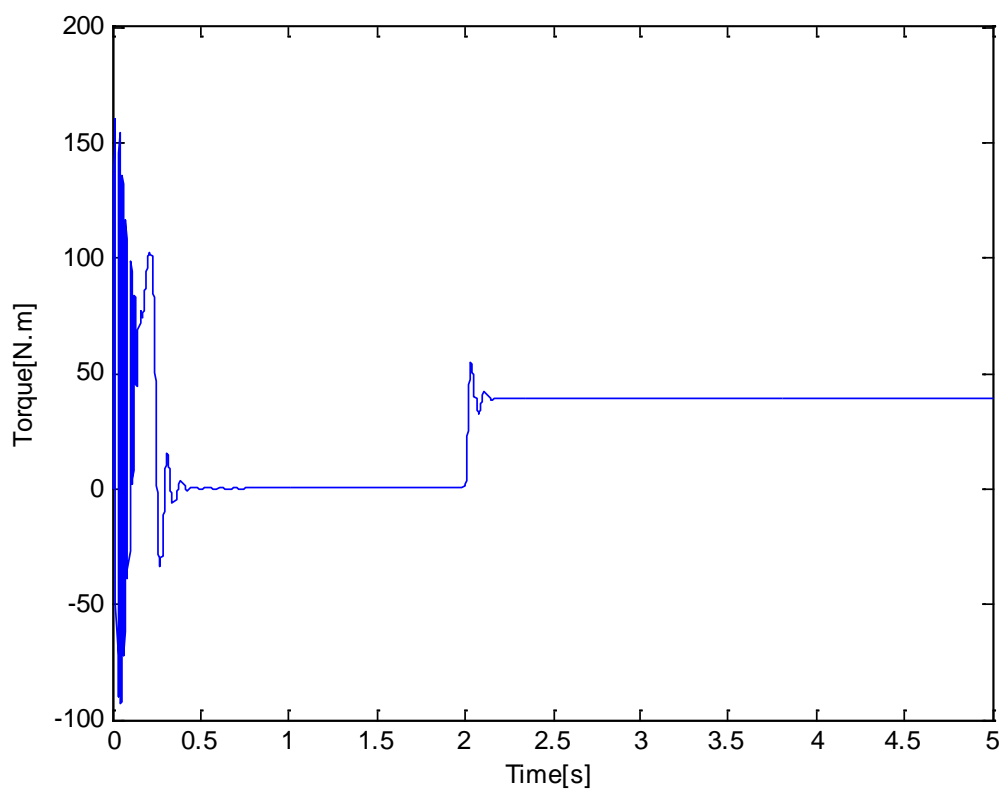
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 5.7 Rychlost motoru při momentu = 39[N.m]

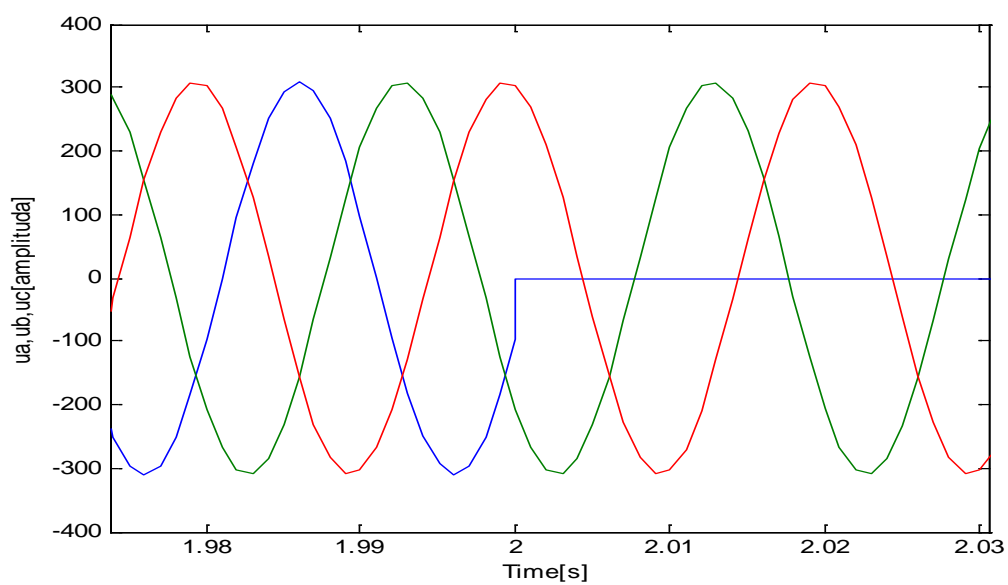


Obr. 5.8 Frekvence rotorového napětí při momentu=39[N.m]



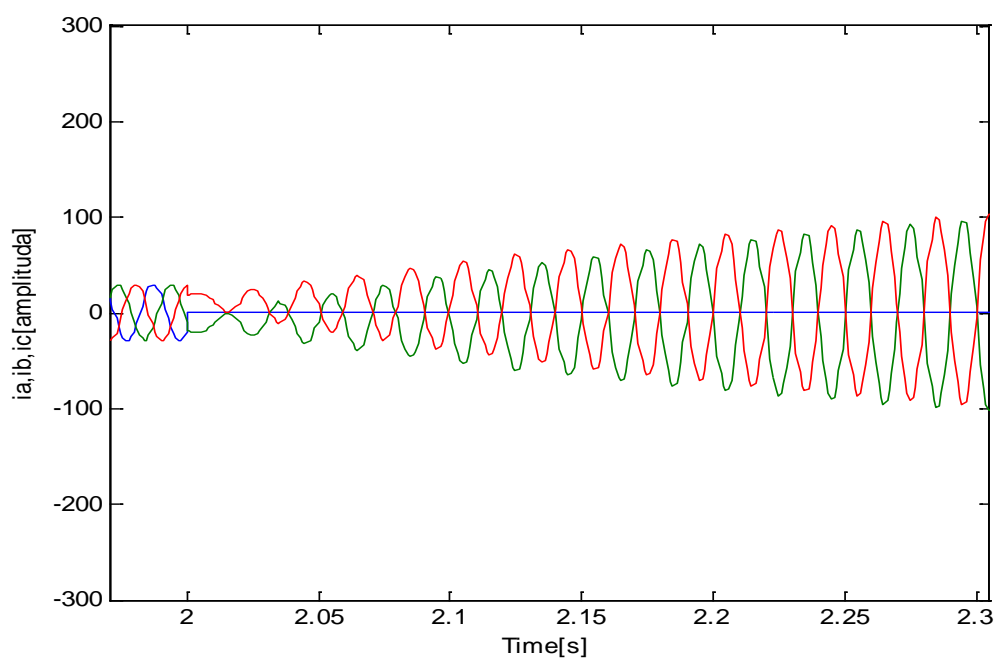
Obr5.9 Moment motoru

5.1.2 Zkrat jedné fáze statoru v čase 2s

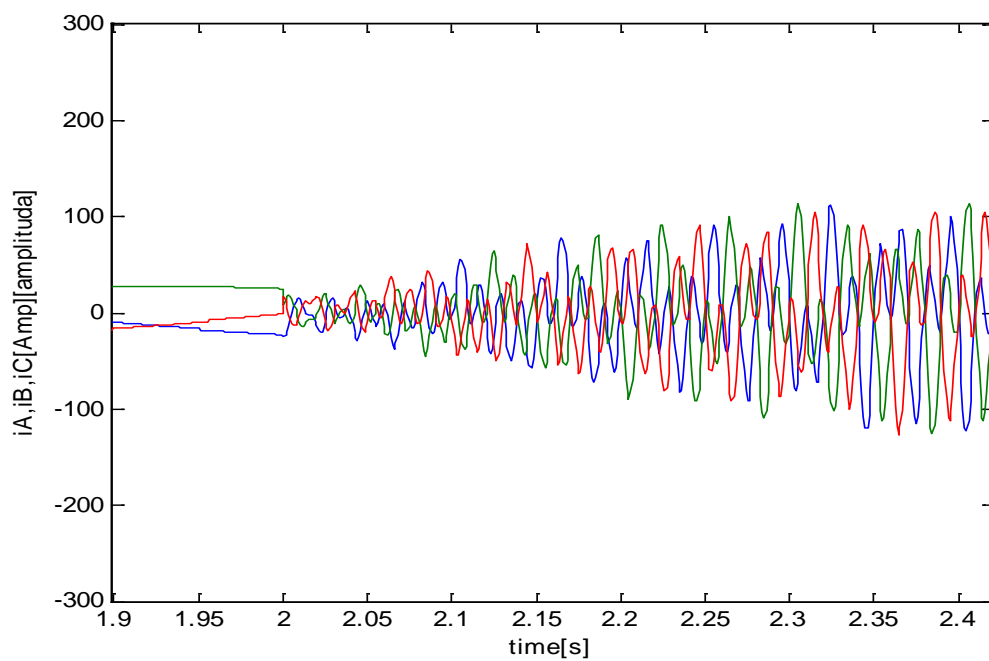


Obr.5.10 Statorové napětí při přerušení jedné fáze statoru

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

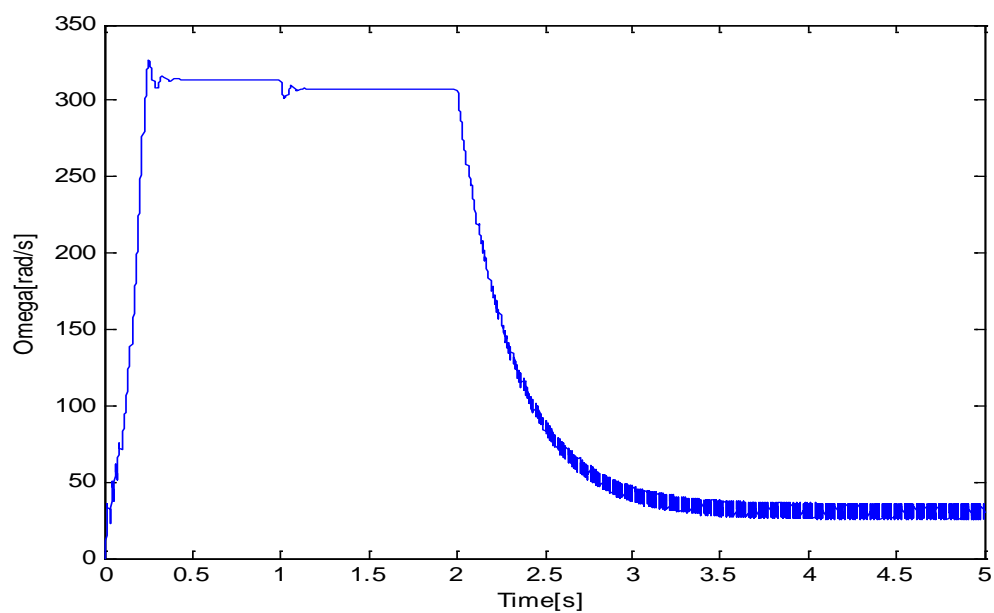


Obr.5.11 Statorové proudy při přerušení jedné fáze statoru.

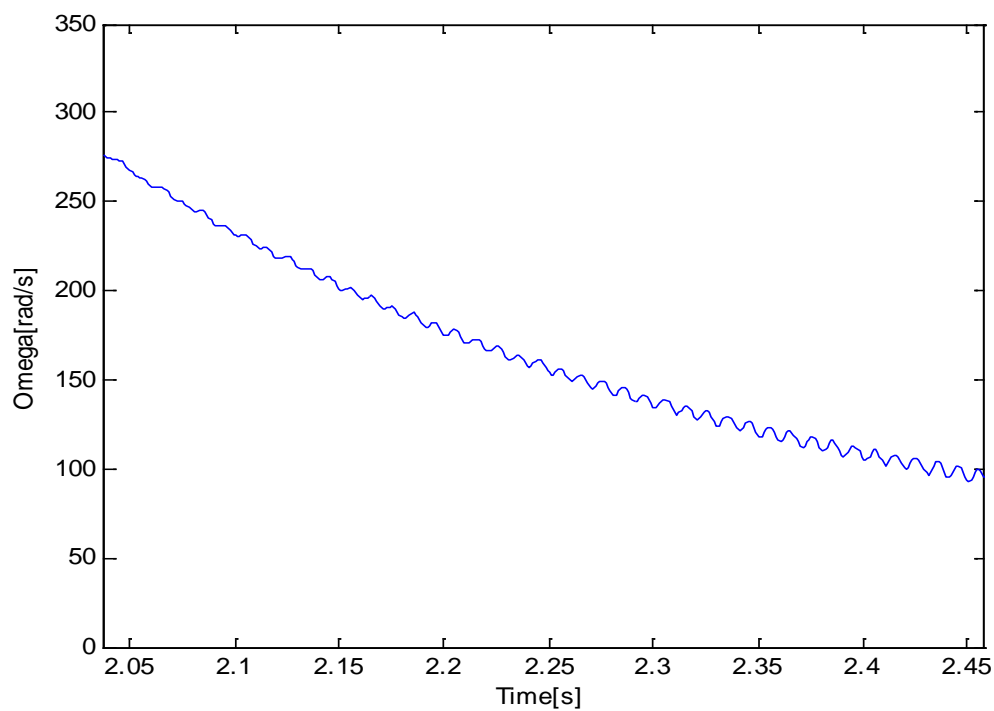


Obr.5.12 Rotorové proudy při přerušení jedné fáze statoru.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

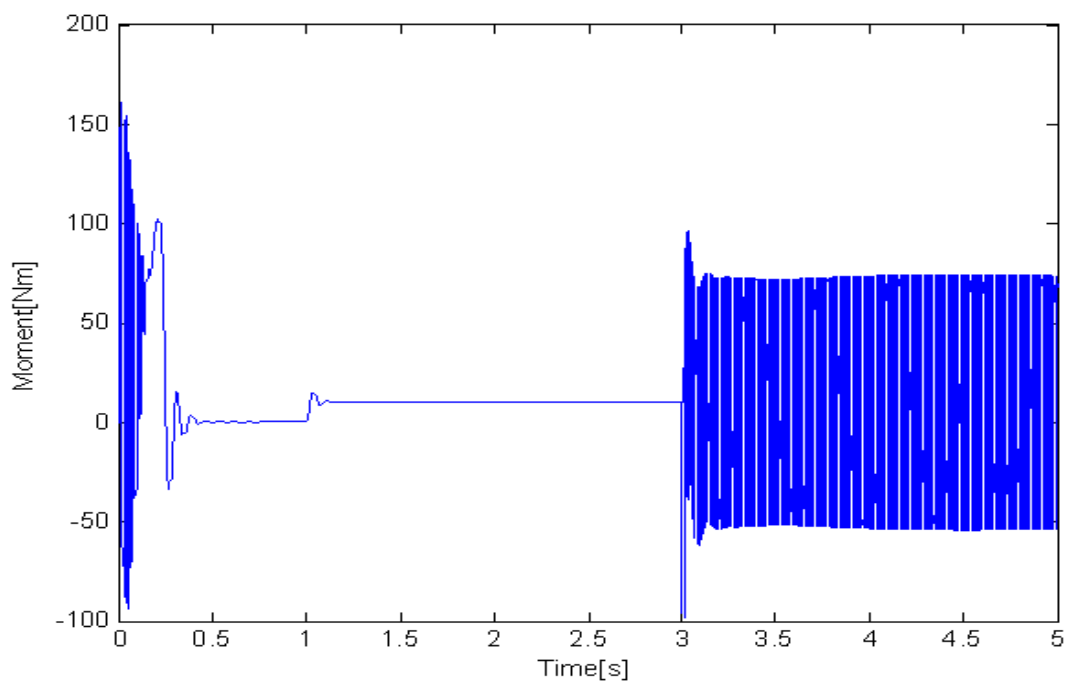


Obr.5.13 Rychlost motoru při přerušení jedné fáze statoru.

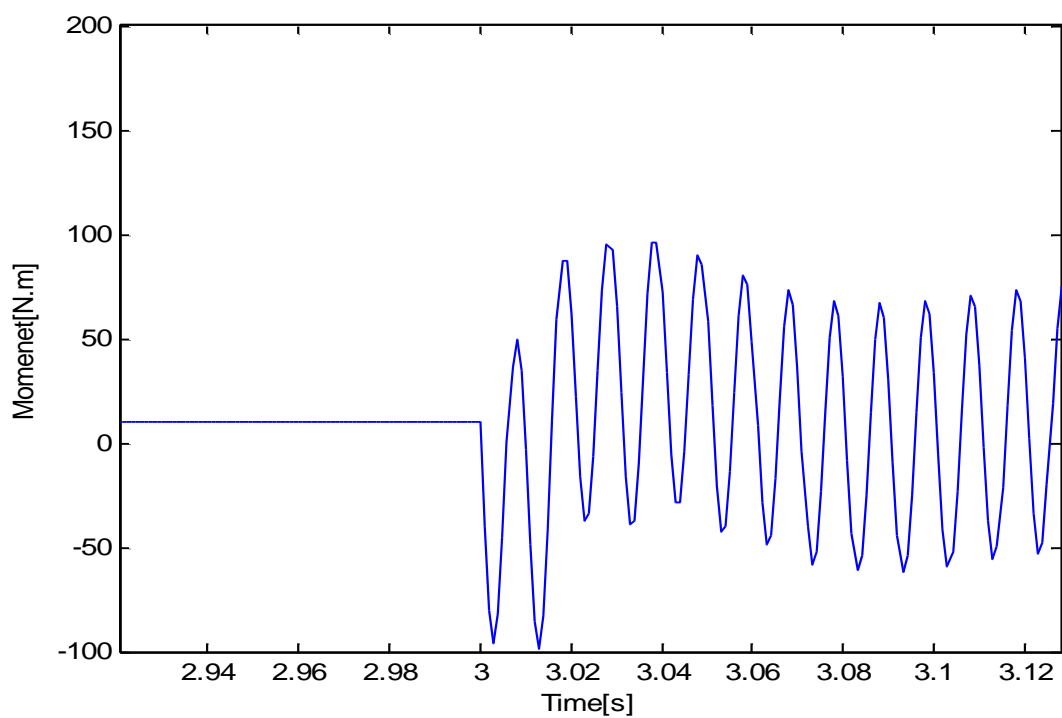


Obr.5.14 Výřez křivky obr. 5.13

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

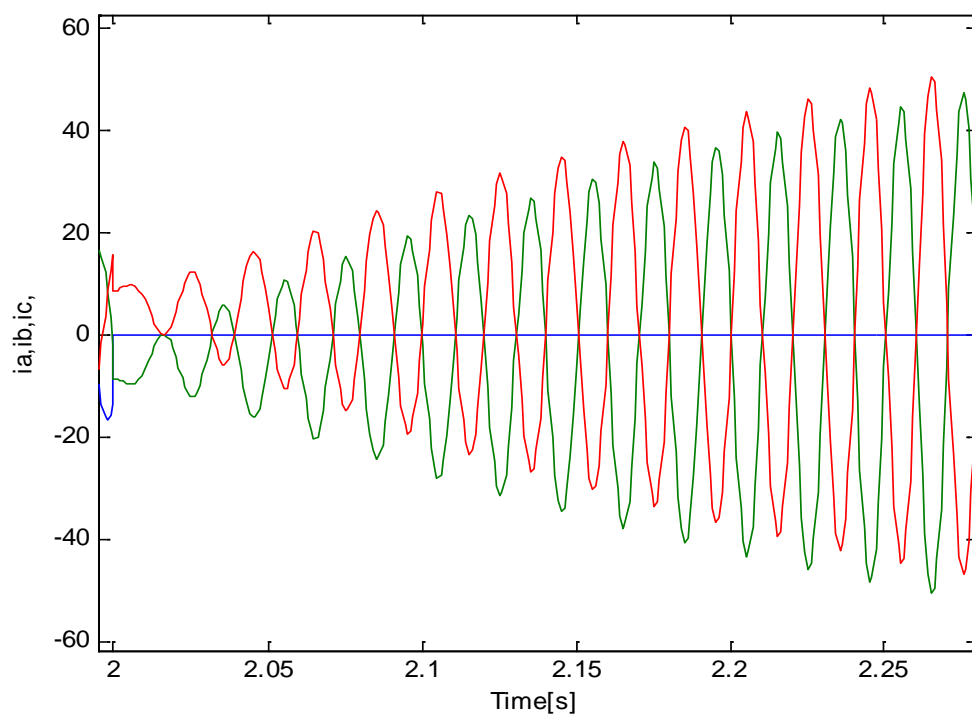


Obr. 5.15 Moment při zkratu jedné fáze statoru

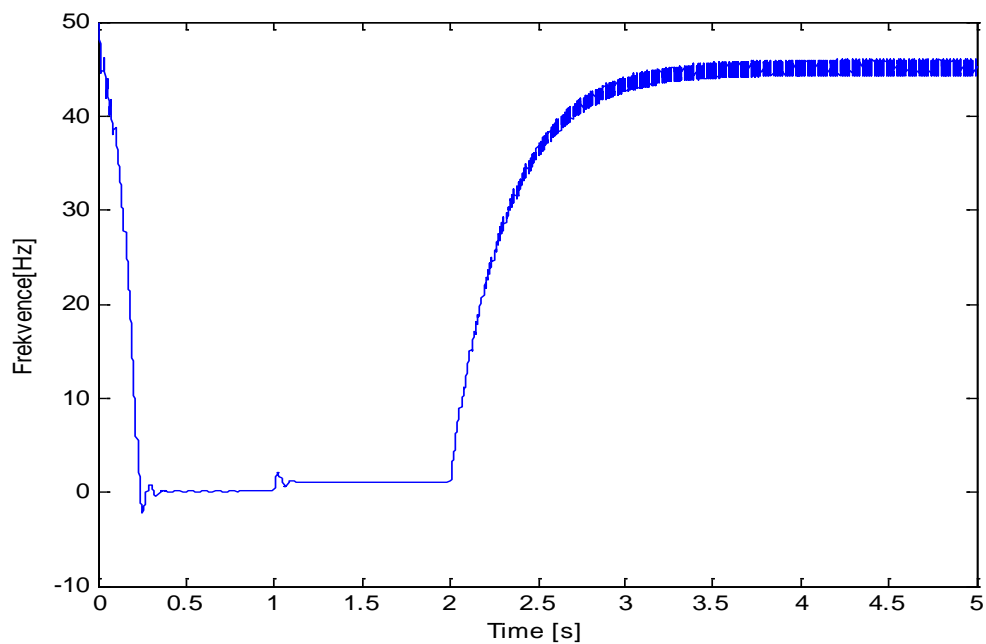


Obr. 5.16 Výřez křivky obr.5.15 moment při zkratu jedné fáze statoru

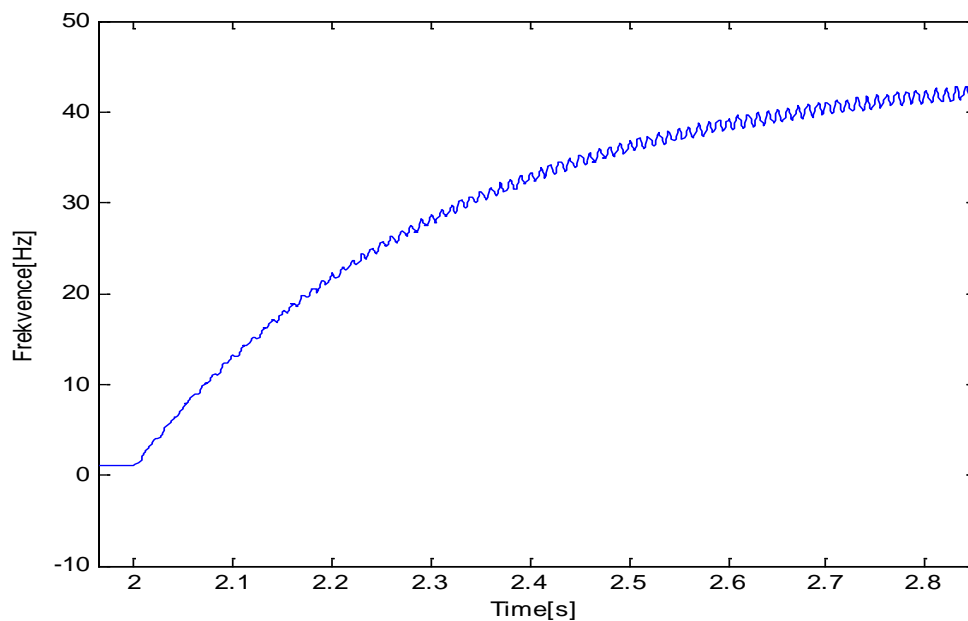
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 5.17 Statorové proudy při přerušení jedné fáze statoru při zatěžovacím momentu=20[N.m]



Obr. 5.18 Frekvence napětí rotoru při přerušení jedné fáze statoru



Obr.5.19 Výřez křivky obr. 5.18

5.2 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru (náhradní schéma)

- Statorem ekvivalentní obvod:

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1 (R_1 + jX_1)$$

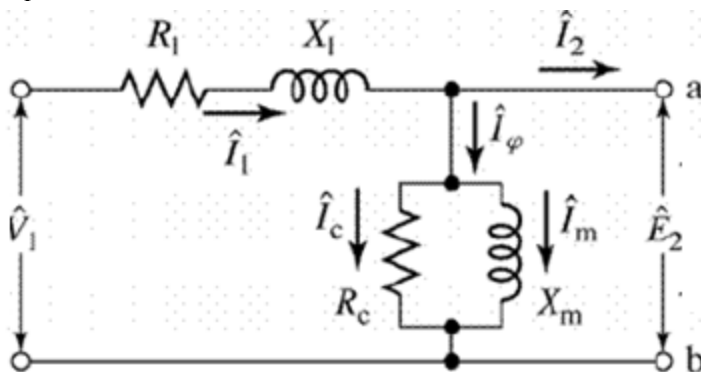
\hat{V}_1 = Statorové line-to-neutrál terminál napětí

\hat{E}_2 = (line-to-neutrál)

\hat{I}_1 je statorový proud

R_1 = Statorový odpor

X_1 = Statorová reaktance

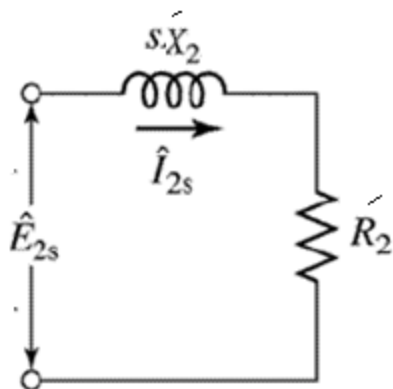


Obr. 5.20 Ekvivalentní obvod statoru asynchronního motoru.

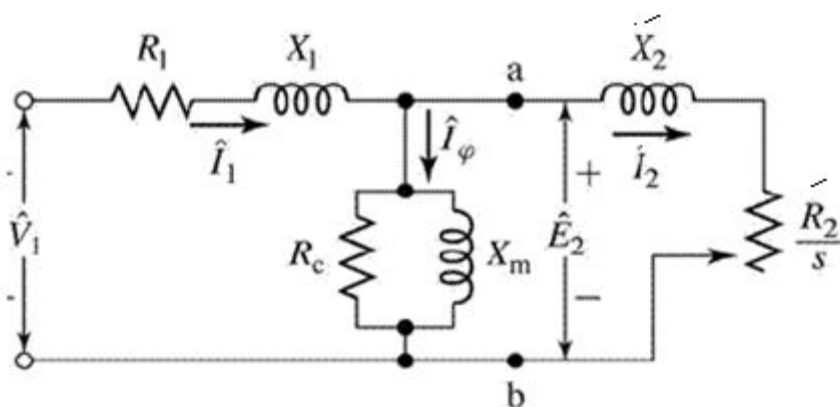
- Rotor ekvivalentní obvod:

R_2 = odpor rotoru

X_2 = rotoru Reaktance



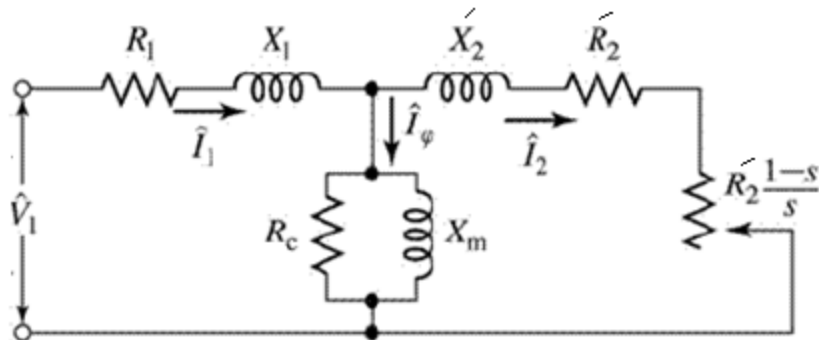
Obr. 5. 21 Rotor ekvivalentního obvodu



Obr . 5.22 Jednofázový ekvivalentní obvod pro mnohafázový asynchronní motor.

- Jednofázový ekvivalent obvodu lze použít pro stanovení širokého spektra výkonnostních vlastností mnohafázových indukčních strojů.

Ekvivalentní obvod se většinou zobrazuje tímto způsobem Obr.5. 23



Obr. 5. 23 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru

Test nakrátko: $U_K = 230V$, $P_K = 71W$, $I_K = 16.4A$, $\cos \varphi_K = 0.881$

Test naprázdno $U_0 = 230V$, $P_0 = 68W$, $I_0 = 1.52A$, $\cos \varphi_0 = 0.881$

Řešíme z testu nakrátko:

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} = \frac{230}{16.4} = 14.02 \Omega$$

$$R_{ekv} = Z_k \cos \varphi_k = (14.02) \cdot (0.881) = 12.35 \Omega$$

$$R_s = R'_r = \frac{R_{ekv}}{2} = \frac{12.35}{2} = 6.17 \Omega$$

$$X_{ekv} = Z_k \sin \varphi_k = (14.02) \cdot (0.4731) = 6.62 \Omega$$

$$X_s = X'_r = \frac{X_{ekv}}{2} = \frac{6.62}{2} = 3.31 \Omega$$

Řešíme z testu naprázdno

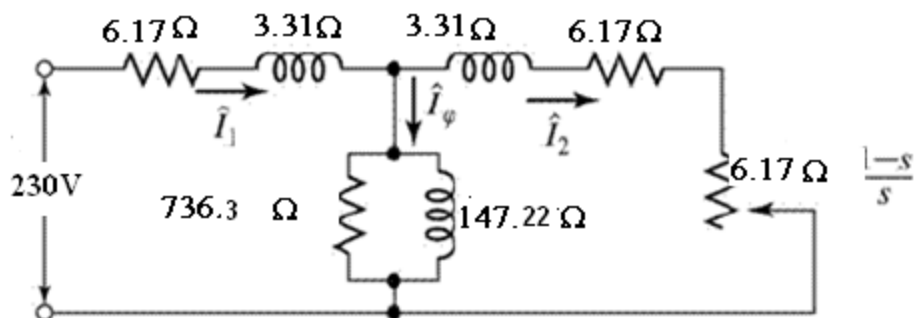
$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \sqrt{(6.175)^2 + (3.3)^2} = 7 \Omega$$

$$I_c = I_0 \cos \varphi_0 = 1.52 \cdot 0.196 = 0.298A$$

$$R_c = \frac{U_0 - Z_s I_0}{I_c} = \frac{230 - (7) \cdot (1.52)}{0.298} = 736.3 \Omega$$

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 = 1.52 \cdot 0.9806 = 1.49 A$$

$$X_m = \frac{U_0 - Z_s I_0}{I_m} = \frac{230 - (7) \cdot (1.52)}{1.49} = 147.22 \Omega$$



Obr. 5. 24 Ekvivalentní obvod asynchronního motoru.

5.3 Parametry zkoumaného stroje

Výrobce: SIEMENS Elektromotortv s.r.o.

Asynchronní motor typu: 1LA7083-2AA

$P_n = 1100\text{W}$, $n_n = 2845\text{ min}^{-1}$, $p_p = 1$, $f_n = 50\text{ Hz}$, $M_n = 3.6905\text{ Nm}$,

$J_m = 0.017\text{ kgm}^2$

$U_{sn} = 400\text{ V}$ efektivní hodnota – motor zapojen do hvězdy

$I_{sn} = 2.4\text{ A}$ efektivní hodnota jmenovitého fázového proudu

$R_s = 6.18\text{ }\Omega$ odpor fáze statoru

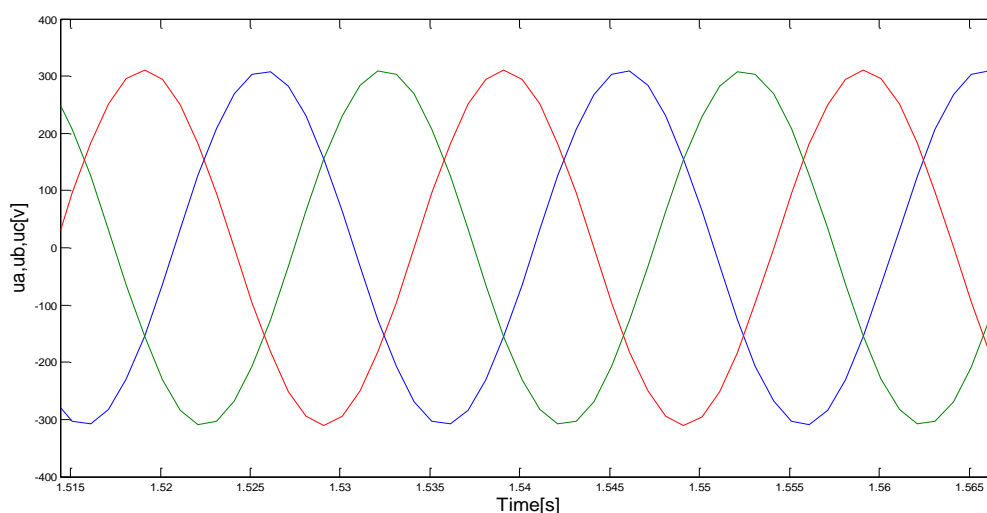
$R_r = 6.18\text{ }\Omega$ odpor fáze rotoru

$L_h = 0.47\text{ H}$ hlavní (magnetizační) indukčnost

$L_{s\sigma} = 0.011\text{ H}$ rozptylová indukčnost fáze statoru

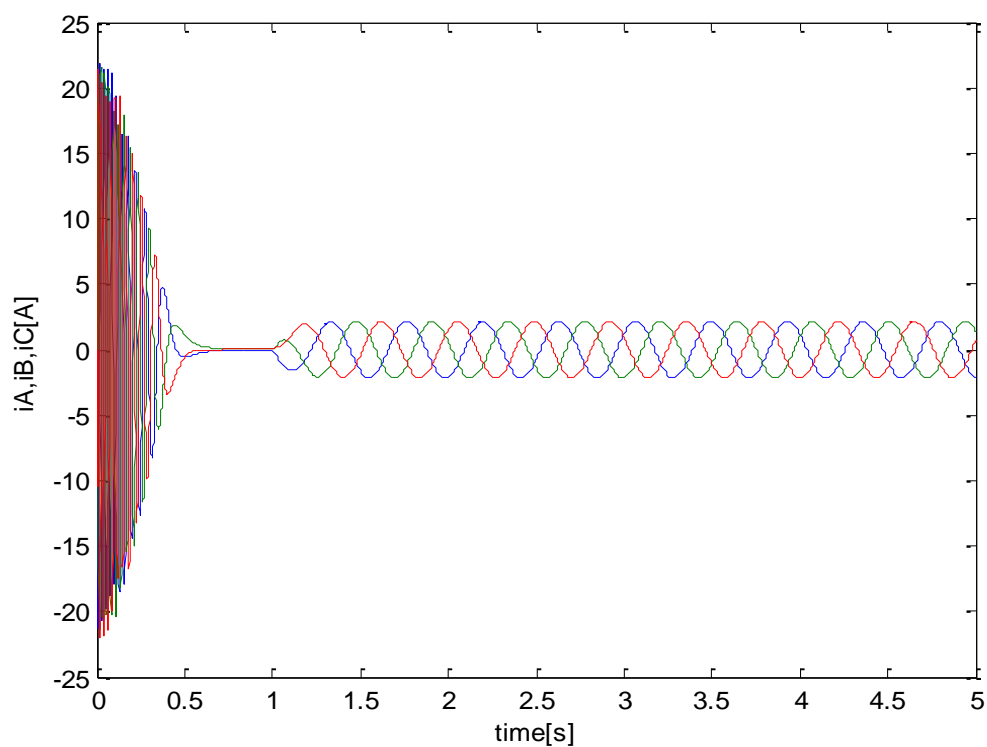
$L_{r\sigma} = 0.011\text{ H}$ rozptylová indukčnost rotoru

5.3.1. Připojení nezatíženého motoru na síť

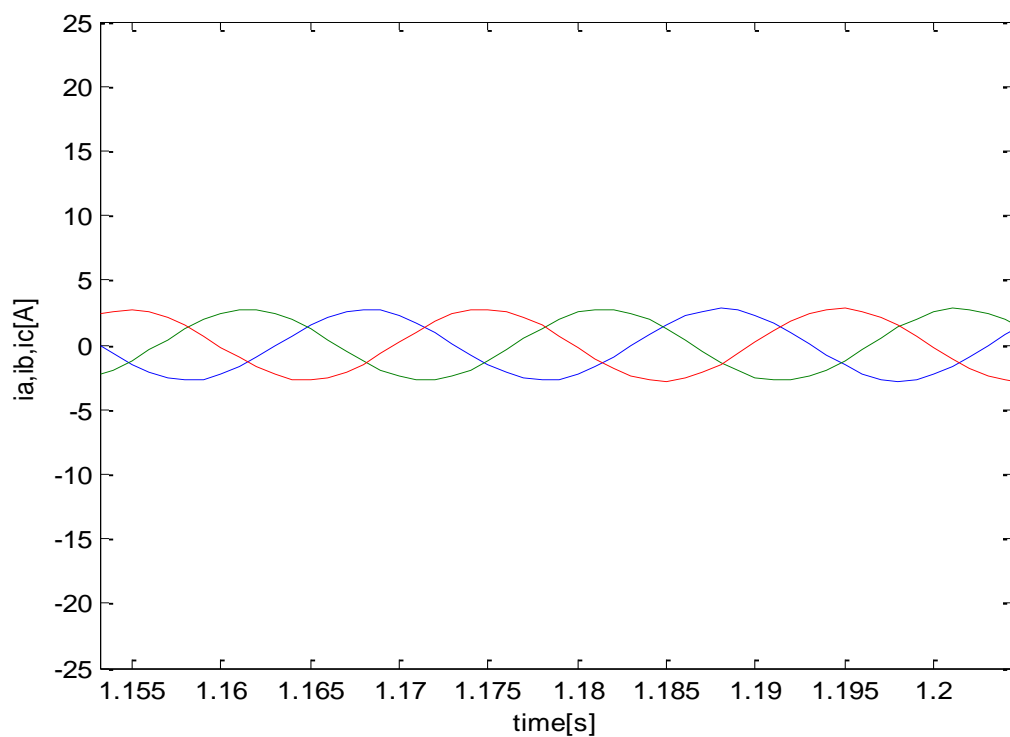


Obr. 5.25 Statorové napětí při moment=3(Nm).

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



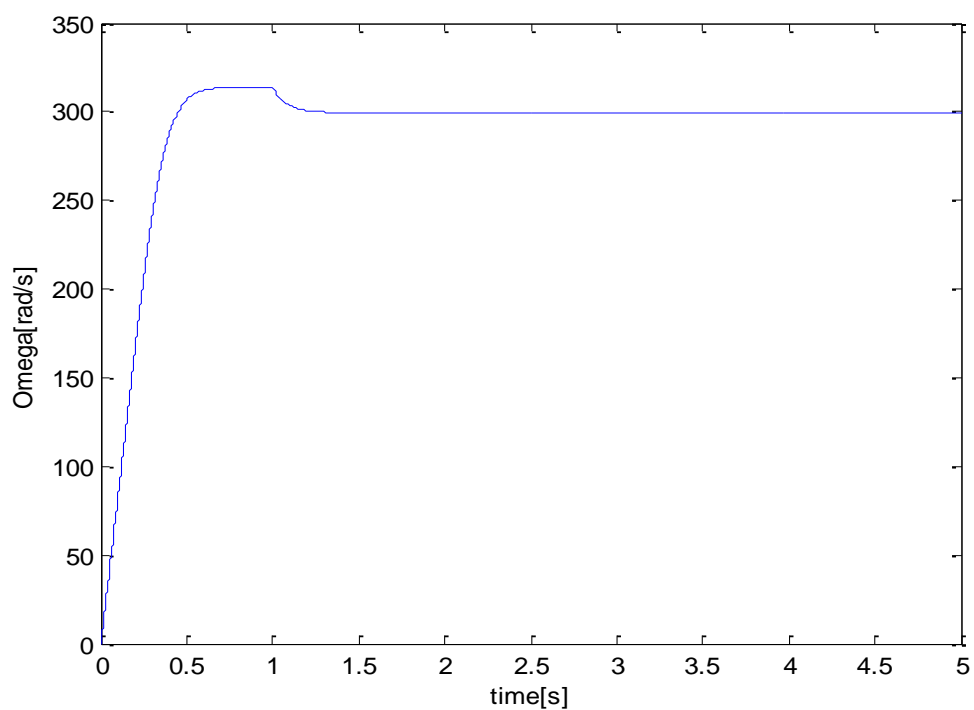
Obr. 5.26 Rotorové proudy při momentu=3[Nm]



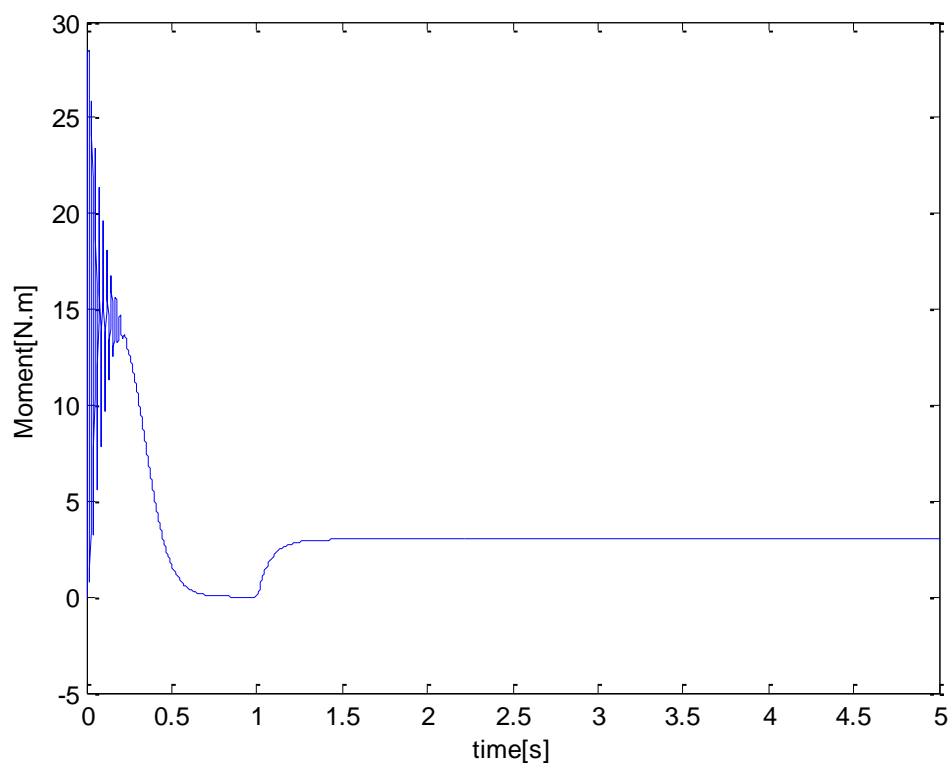
br 5.27 Výřez obrázku statorových proudů při momentu =3[Nm]

O

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

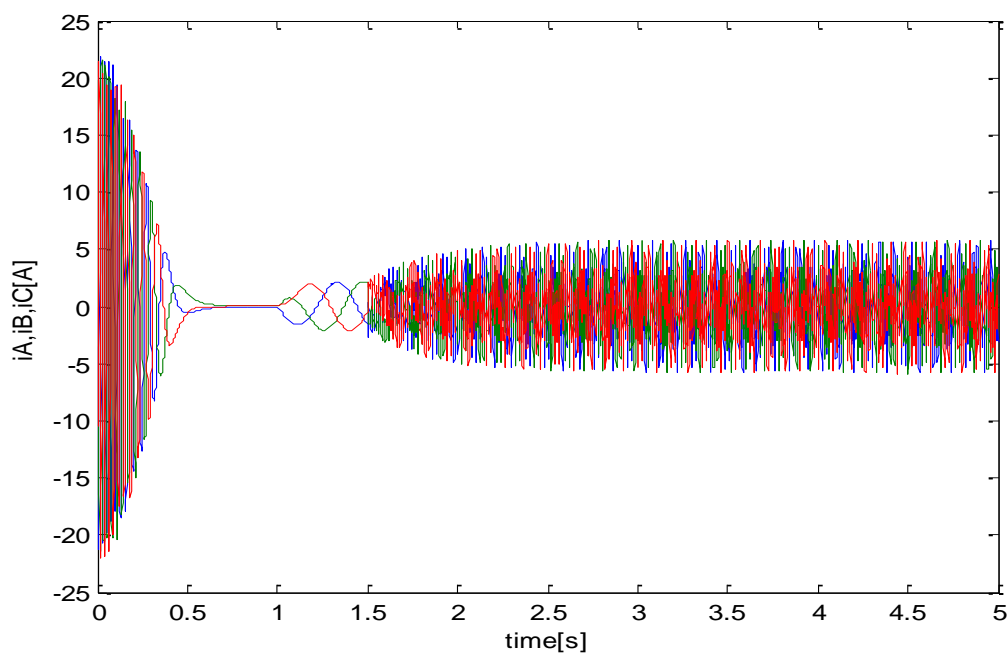


Obr 5.28 Rychlost motoru při momentu=3[Nm]

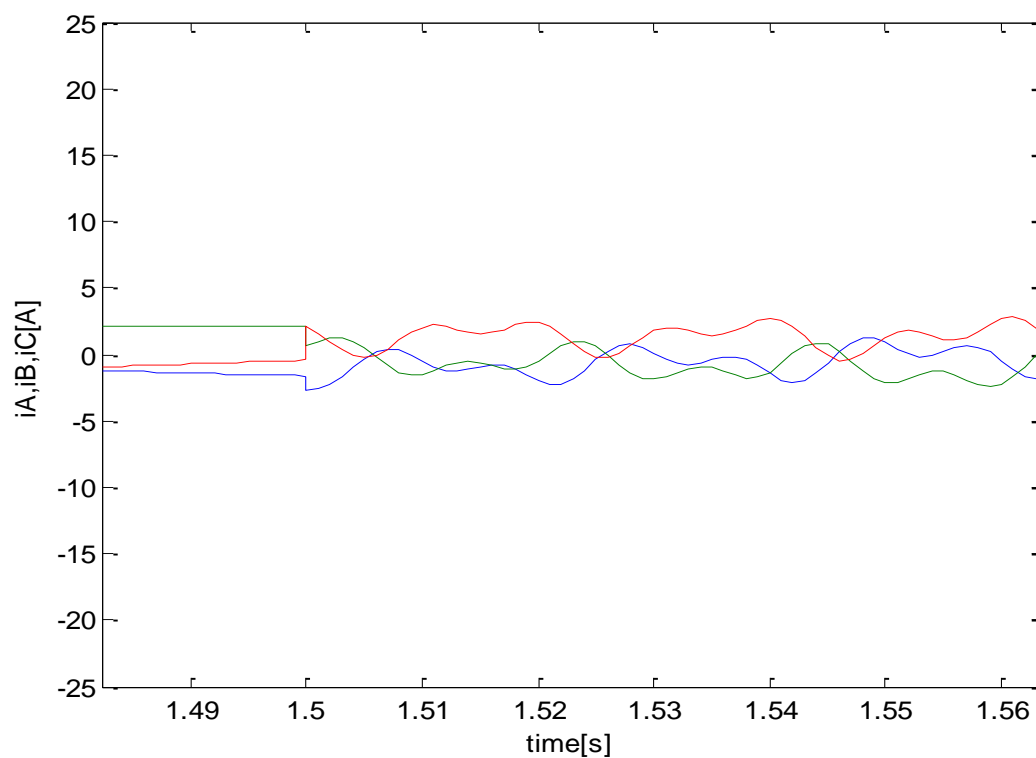


Obr. 5.29 Moment motoru.

5.3.2 Zkrat jedné fáze statoru v čase 1.5s

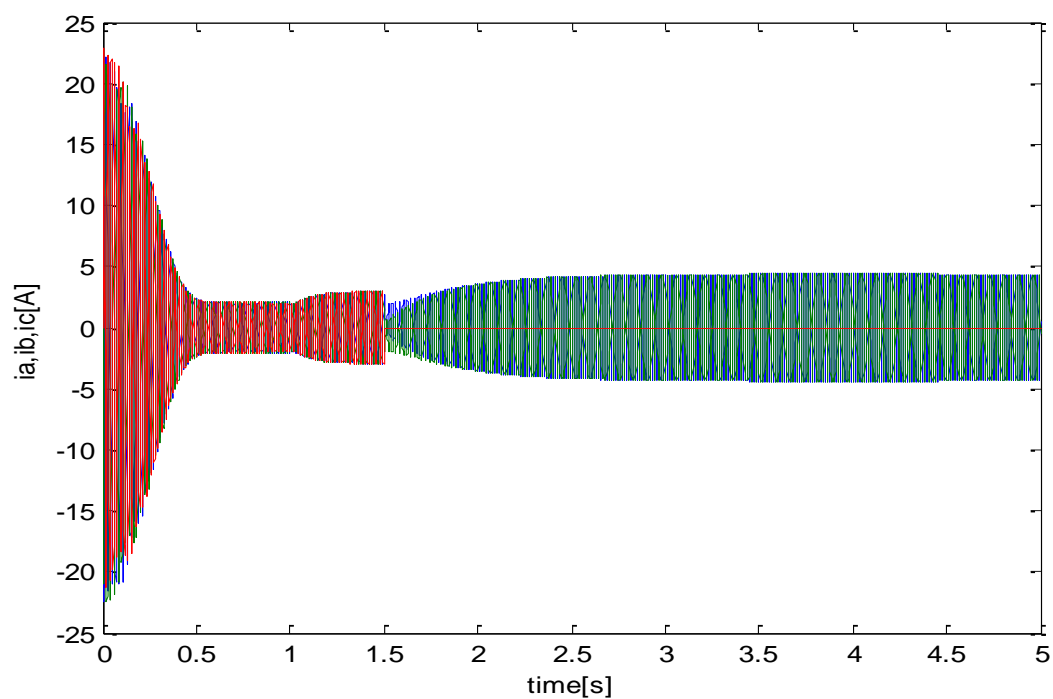


Obr 5.30 Rotorové proudy při přerušení jedné fáze napětí

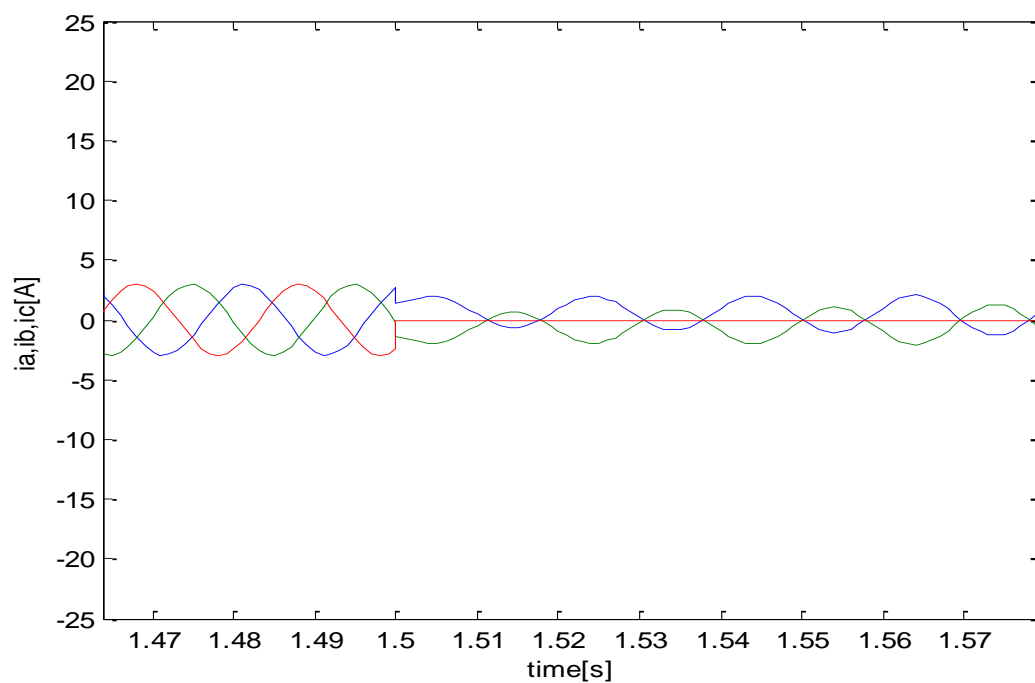


Obr 5.31 Výřez Obr 5.30 rotorových proudů při přerušení jedné fáze napětí statoru

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

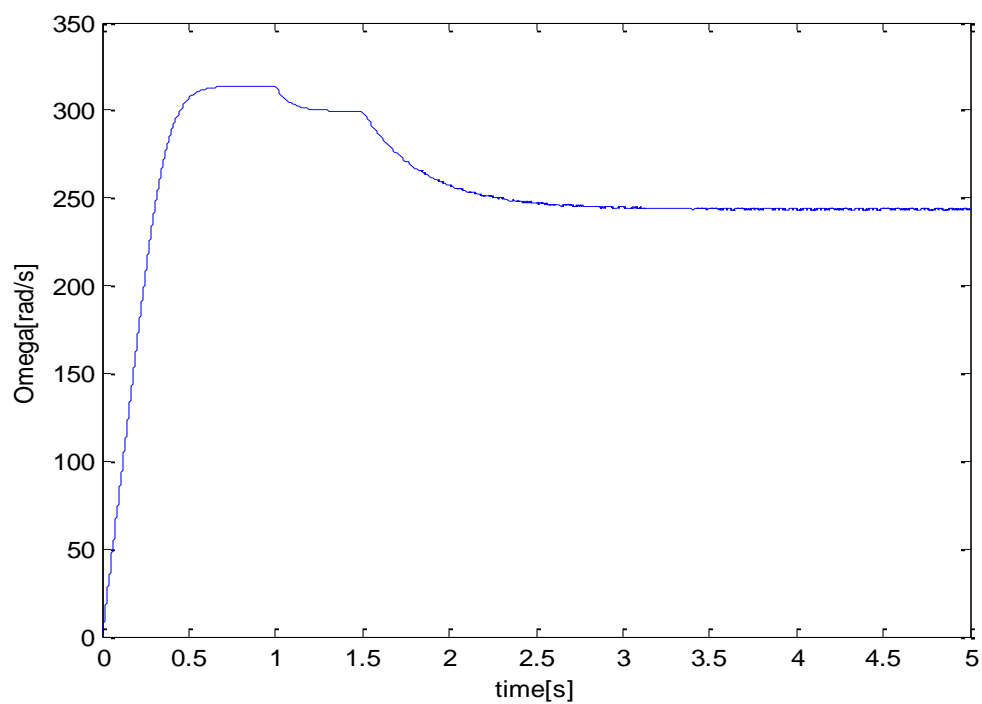


Obr 5.32 Statorové proudy při přerušení jedné fáze napětí statoru

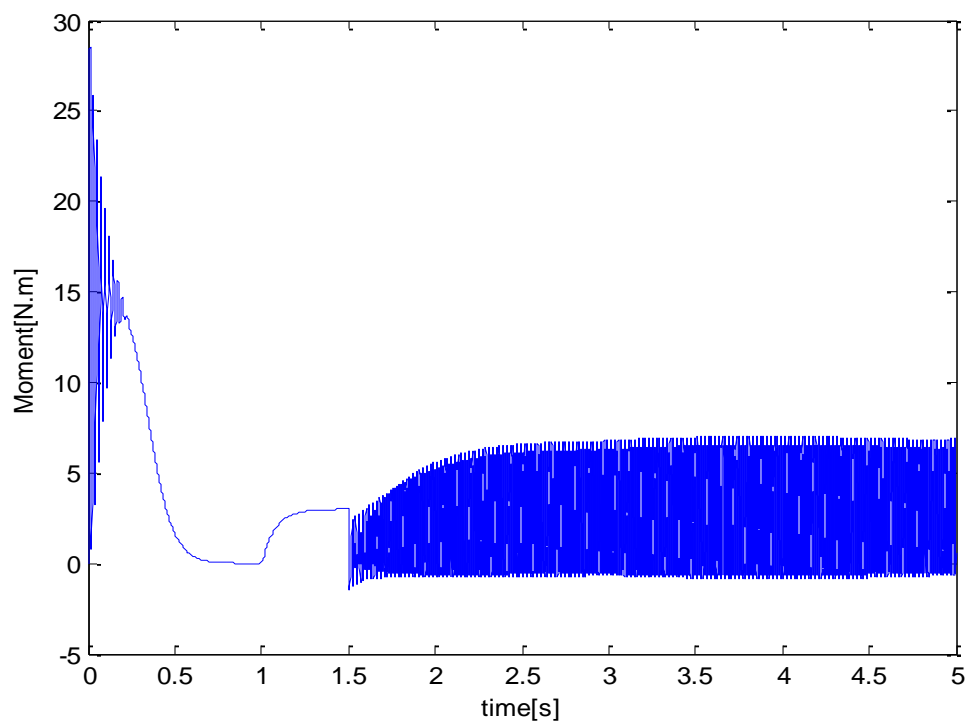


Obr.5.33 Výřez obrázku5.32 statorových proudů při přerušení jedné fáze napětí statoru

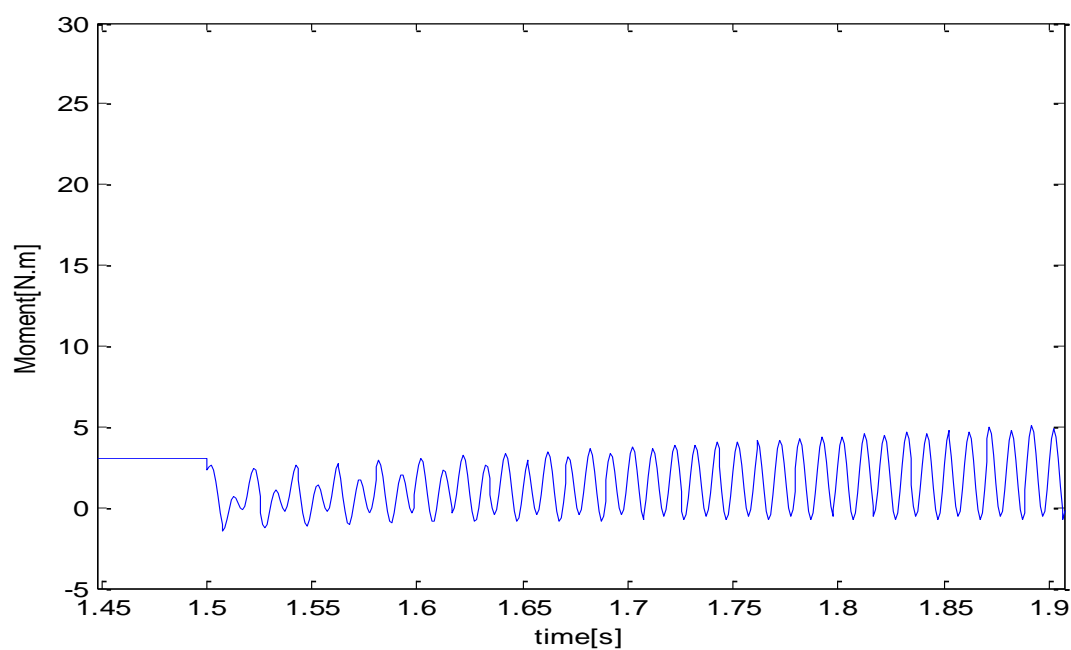
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



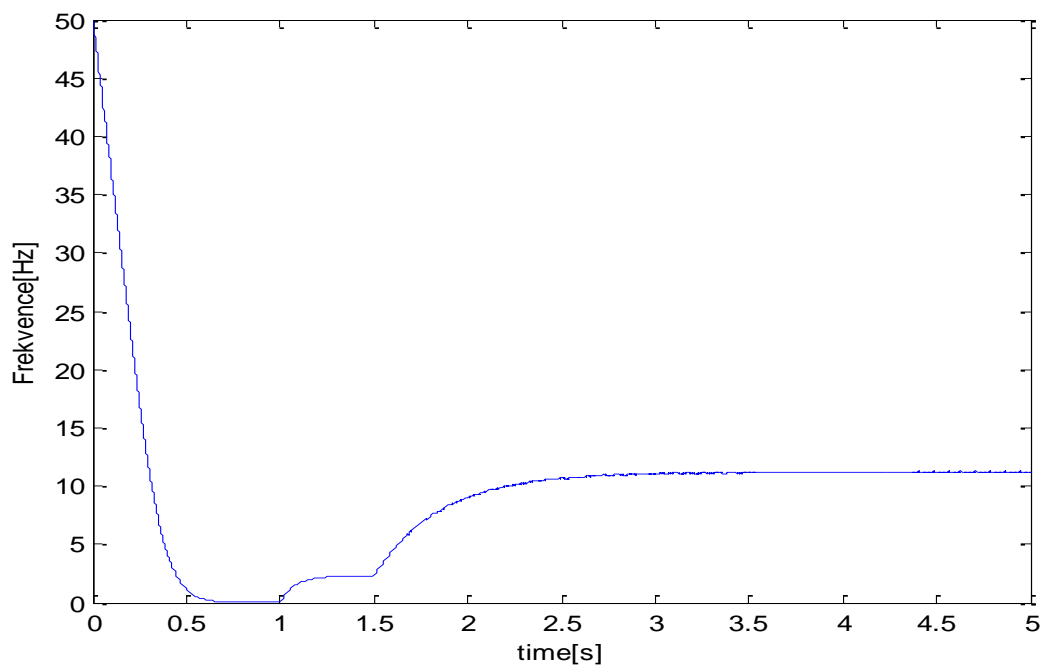
Obr.5.34 Rychlost motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru



Obr.5.35 Moment motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru

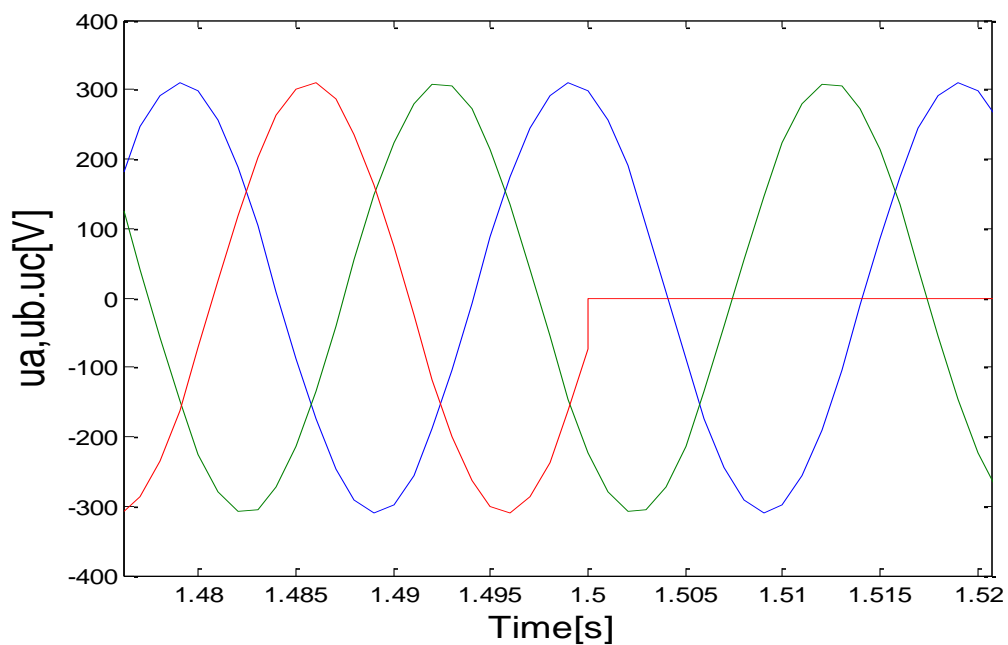


Obr.5.36 Výřez Obrázek5.35moment motoru při přerušení jedné fáze napětí statoru

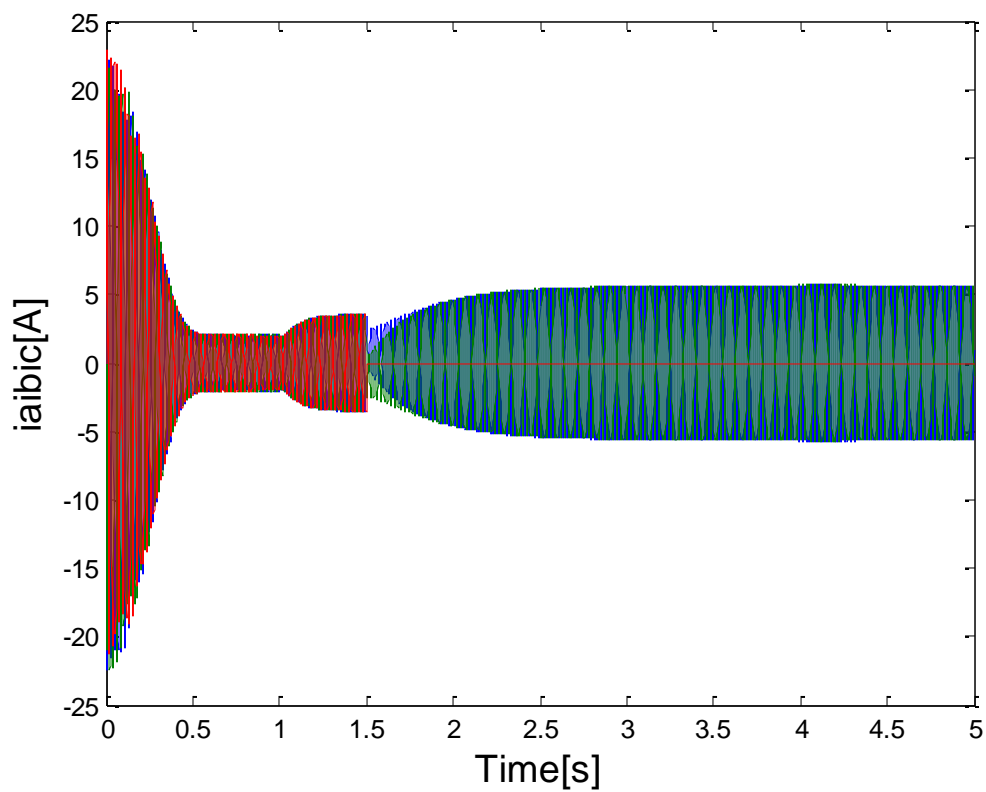


Obr.5.37 Frekvence napětí rotoru při přerušení jedné fáze statoru

5.3.3 Zkrat jedné fáze při 4(Nm) v čase 1.5s

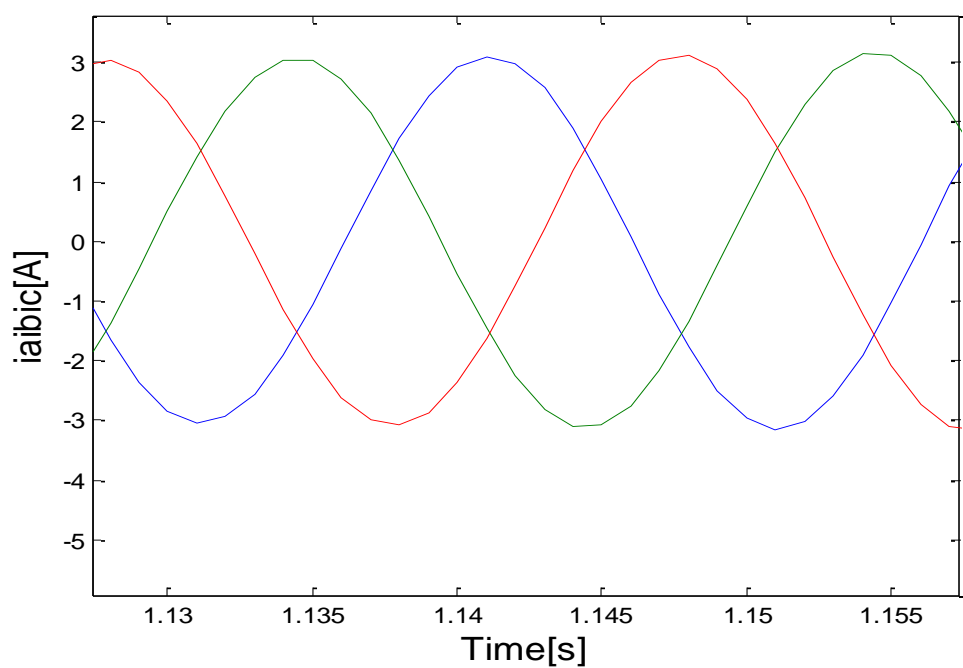


Obr.5.38 Statorové napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm]

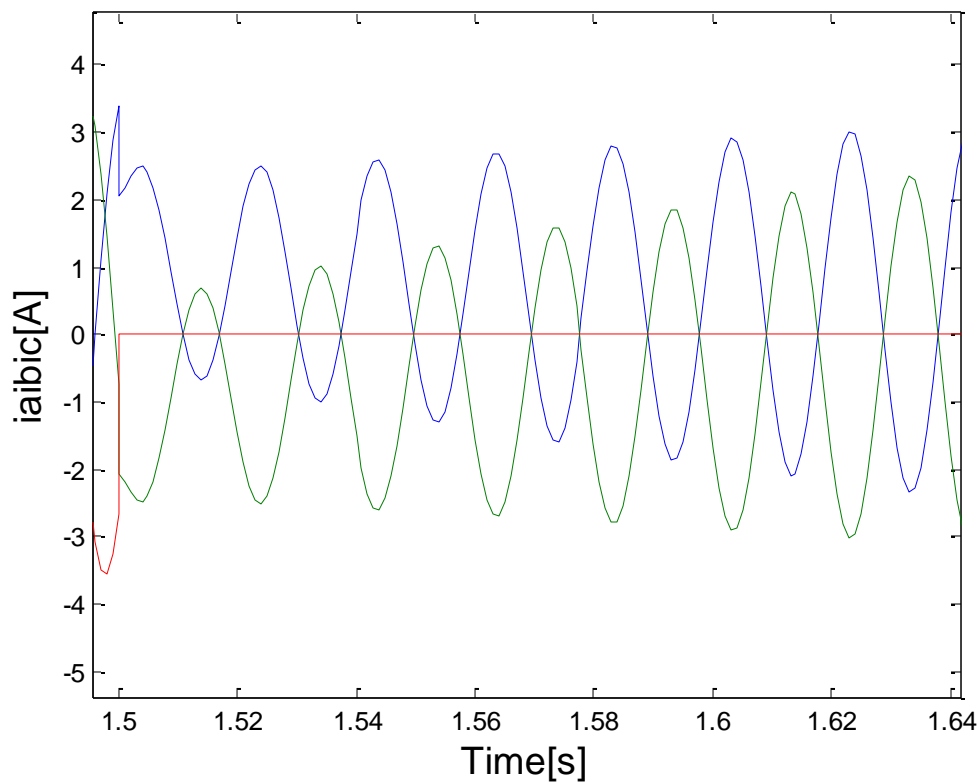


Obr.5.39 Statorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm] zátěž motoru začíná v čase(1s)

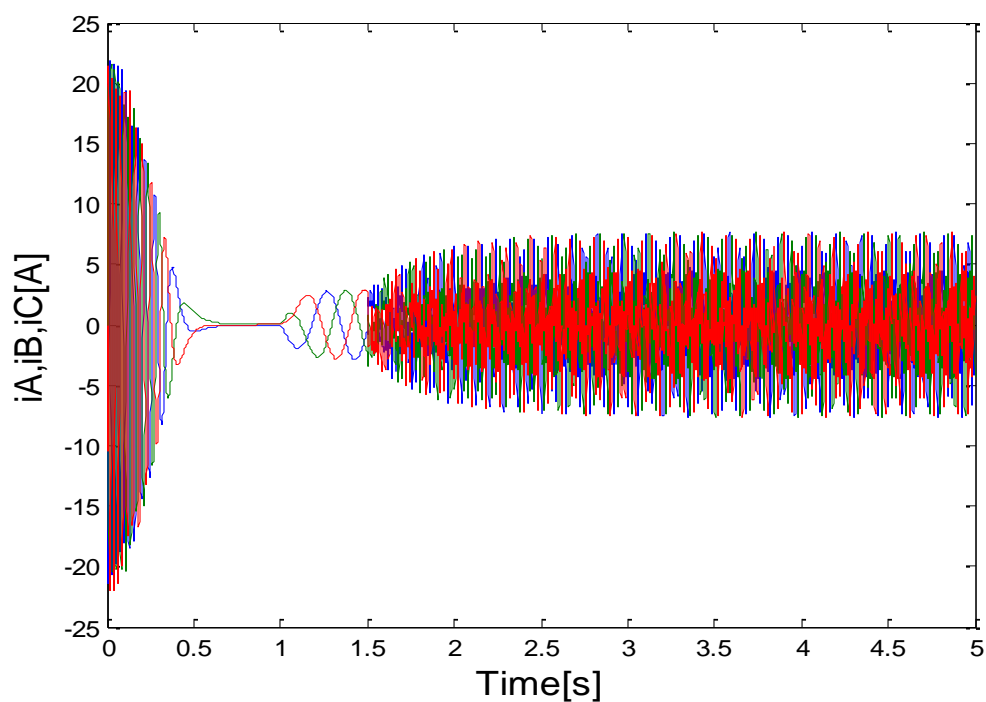
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



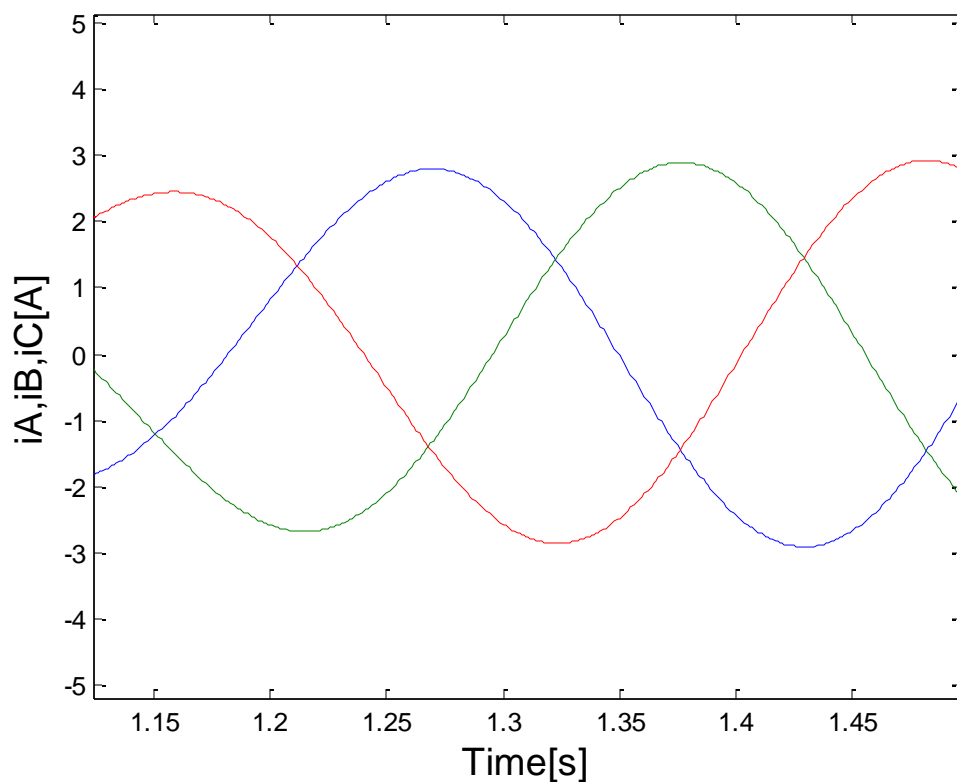
Obr.5.40 Statorové proudy motoru při zátěži = 4[Nm]



Obr.5.41 Statorové proudy zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm]

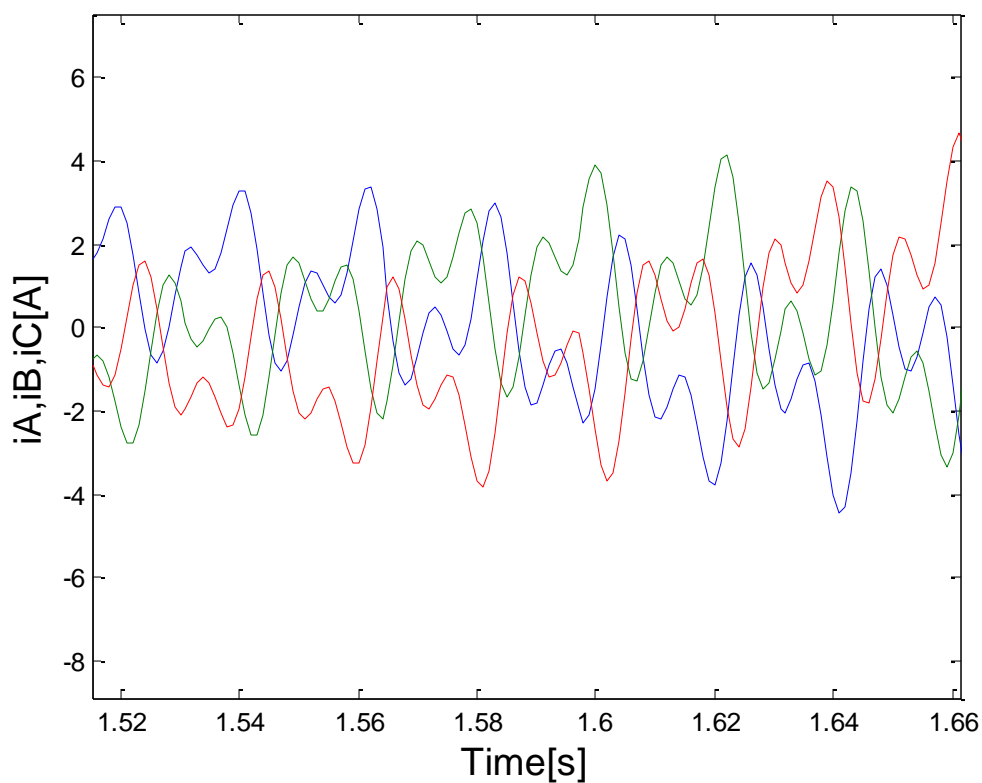


Obr.5.42 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm]

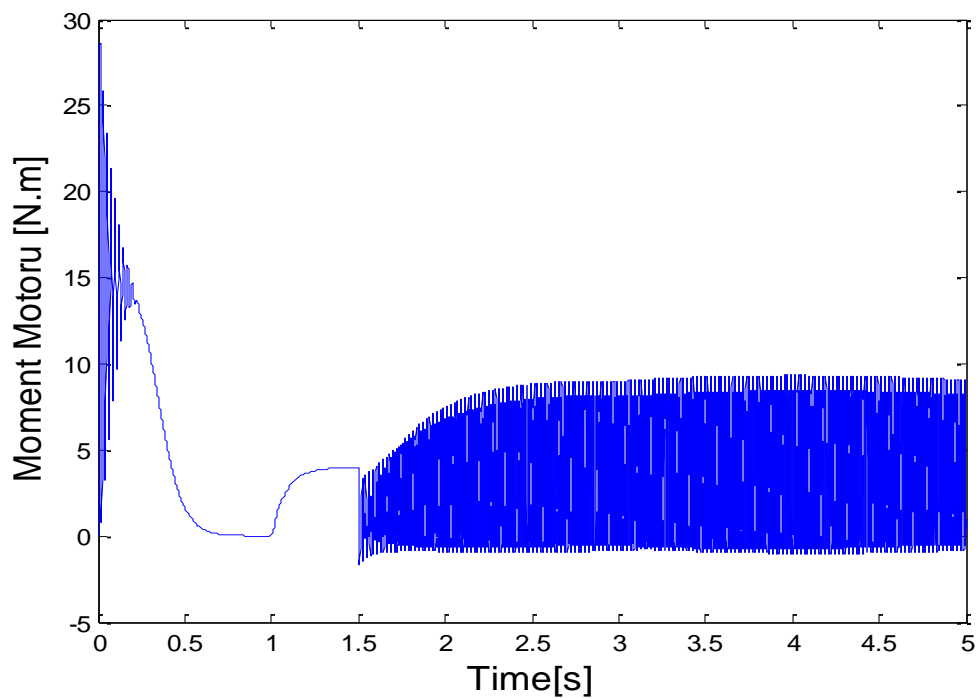


Obr.5.43 Rotorové proudy motoru při zátěži= 4[Nm]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

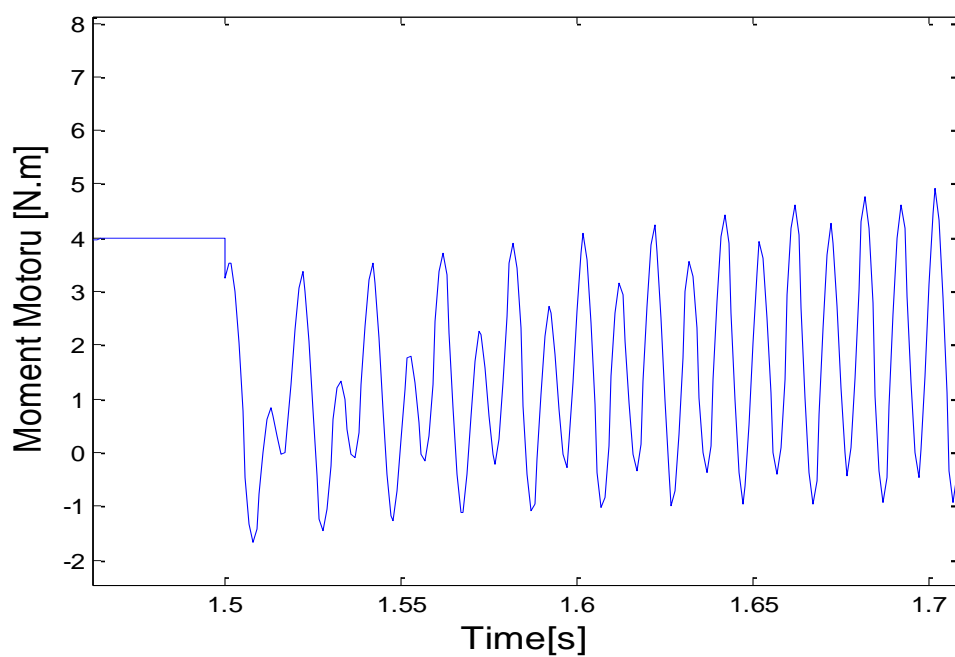


Obr.5.44 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm]

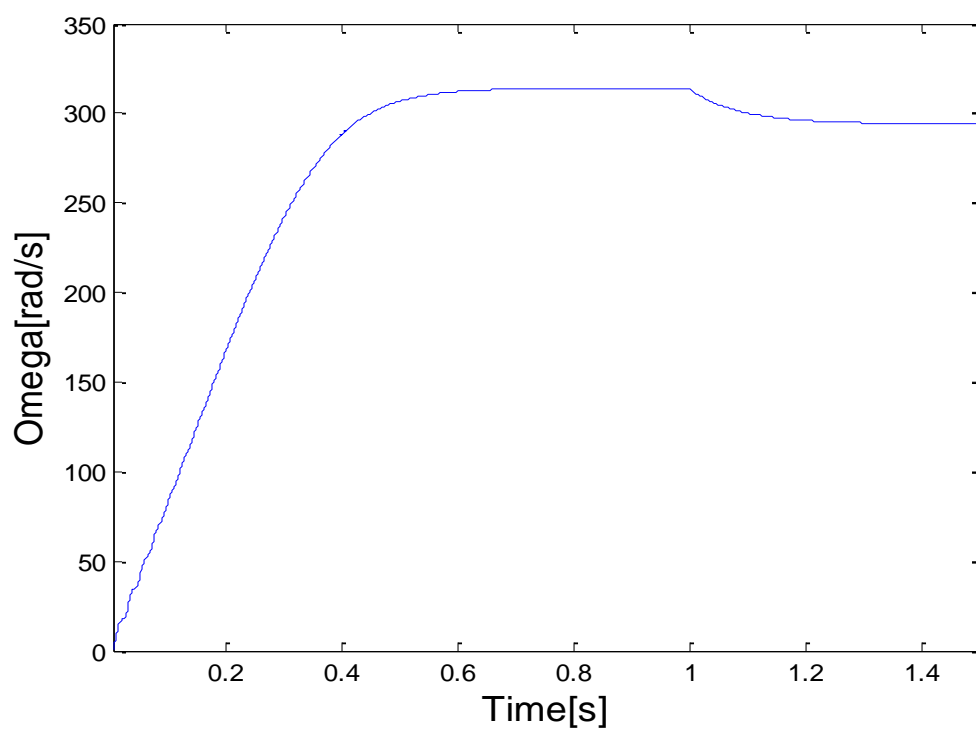


Obr.5.45 Moment při zkratu jedné fáze motoru a při zátěži= 4[Nm] zátěž motoru začíná v čase[1s].

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

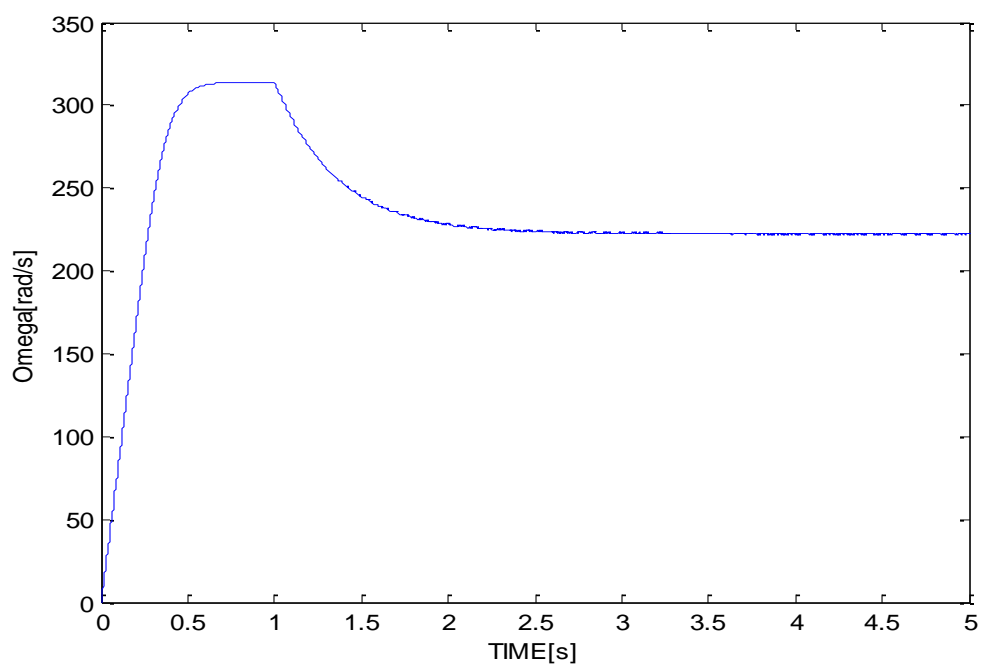


Obr.5.46 Výřez obr.5.45

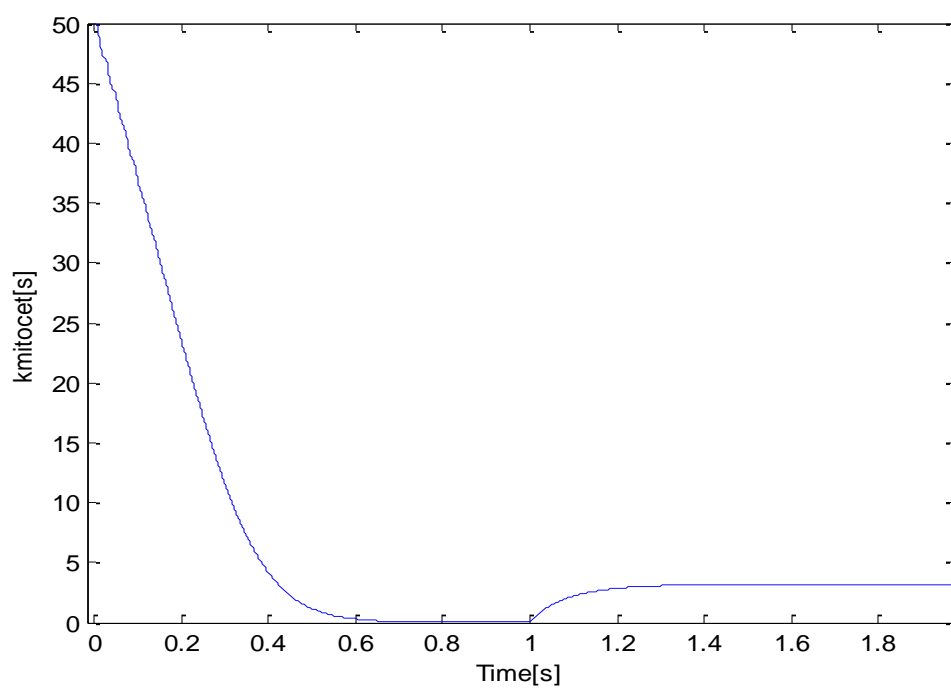


Obr.5.47 Rychlost motoru při zátěži= 4[Nm]

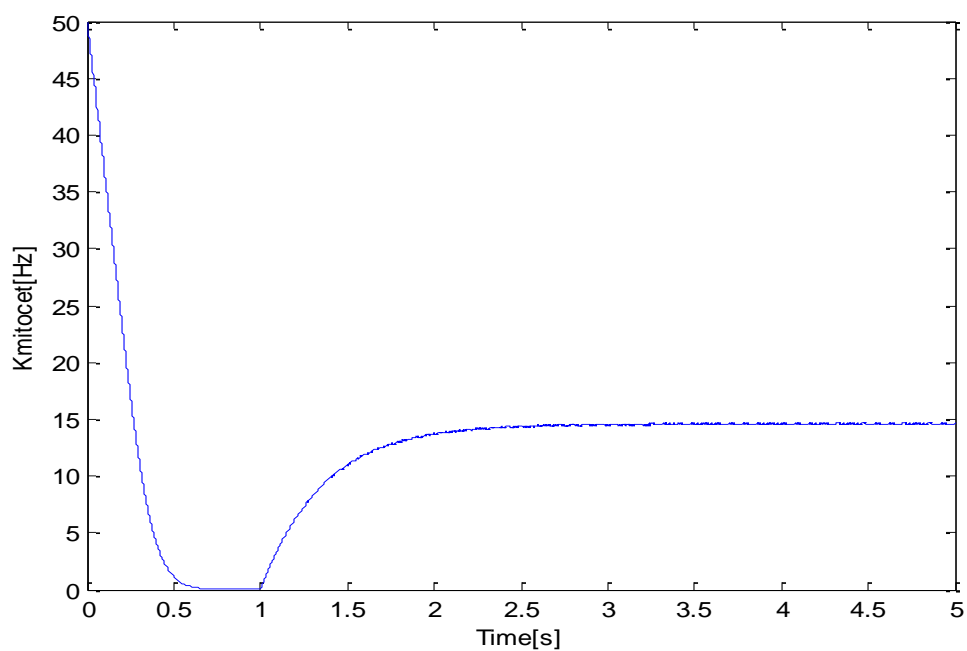
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.5.48 Rychlost motoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm]

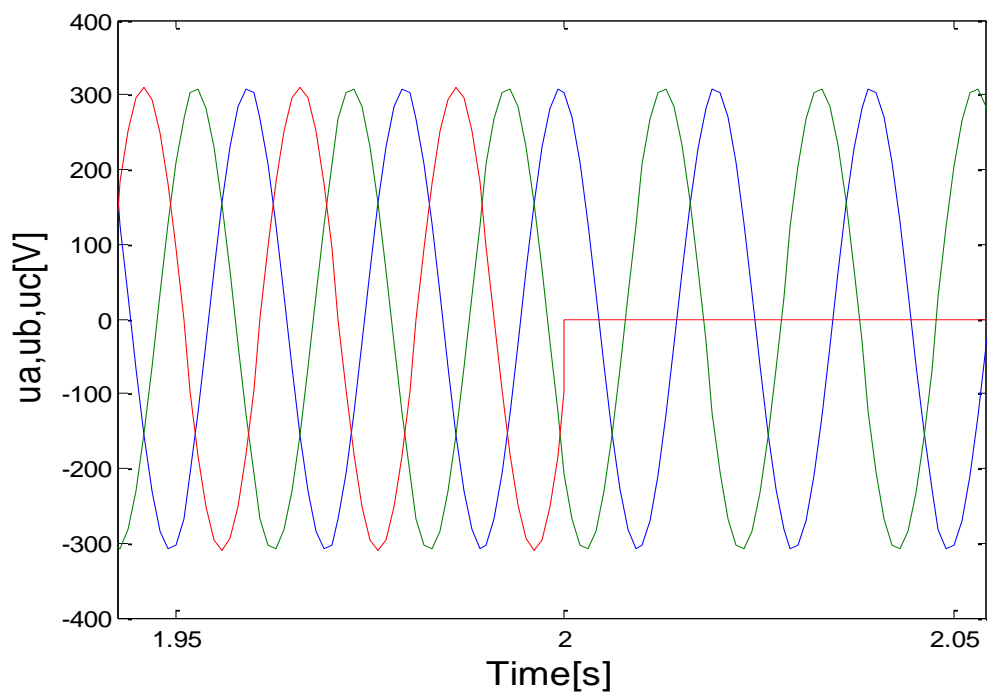


Obr.5.49 Kmitocet rotoru při zátěži= 4[Nm]



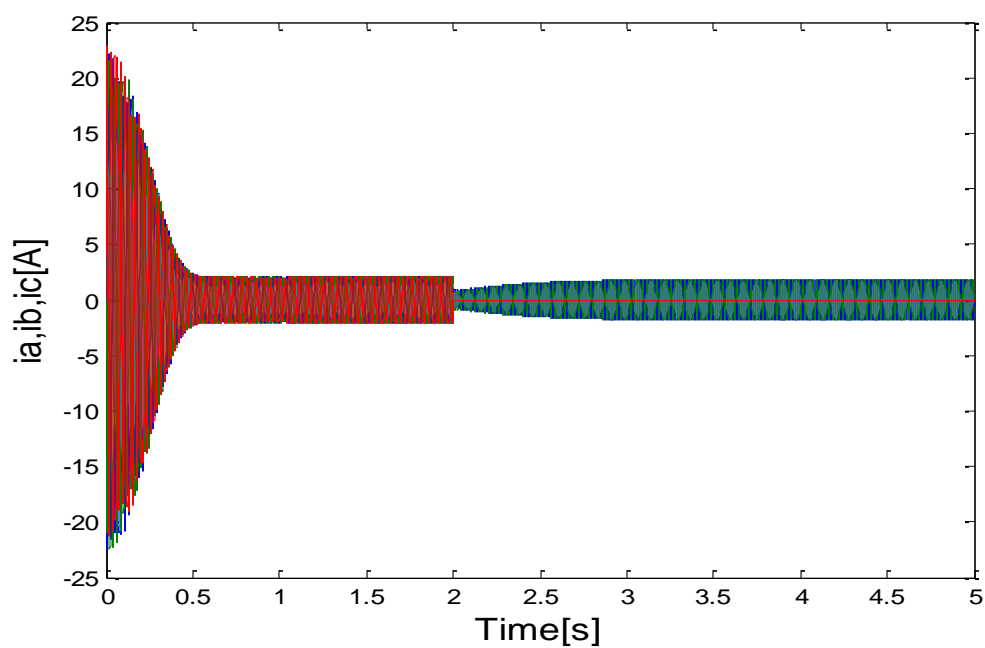
Obr.5.50 Kmitočet rotoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 4[Nm]

5.3.4 Zkrat jedné fáze při zátěži 1(Nm) v čase 2s

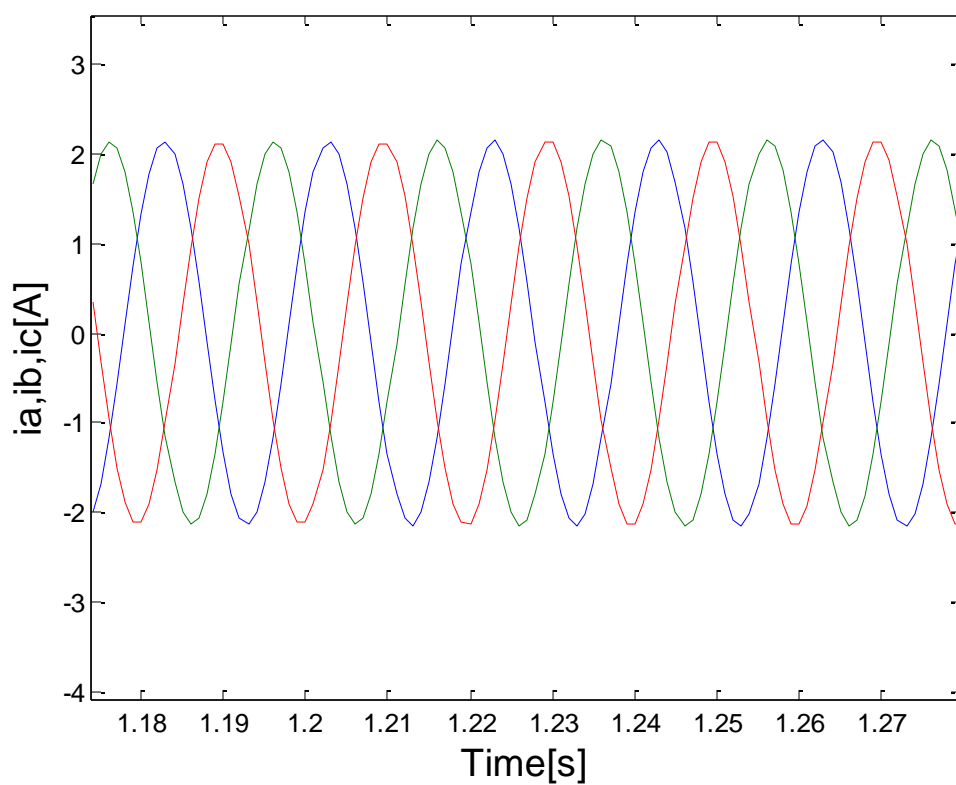


Obr.5.51 Statorové napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži= 4[Nm]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

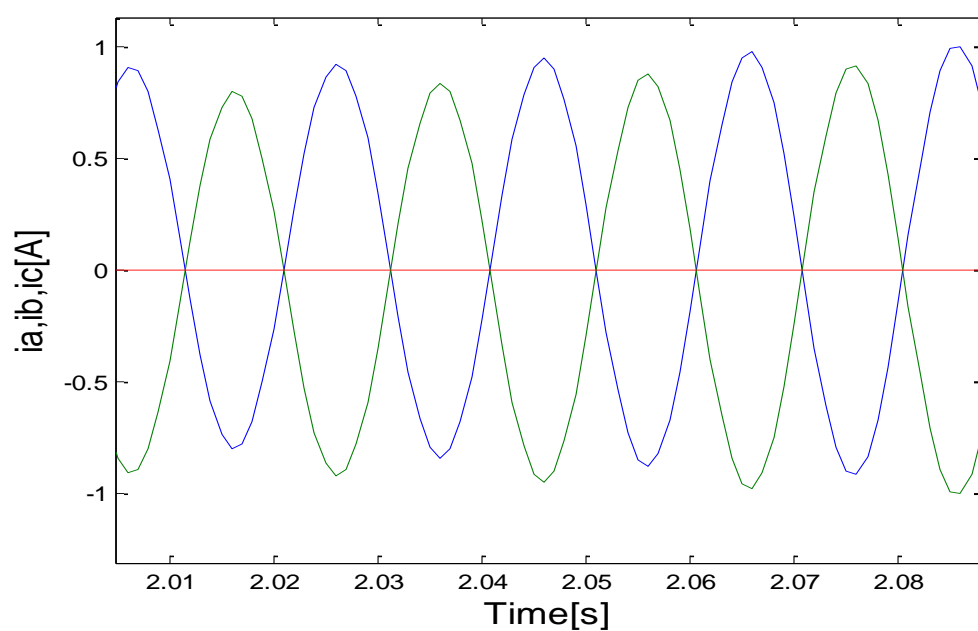


Obr.5.52 Statorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži $i = 1$ [Nm]

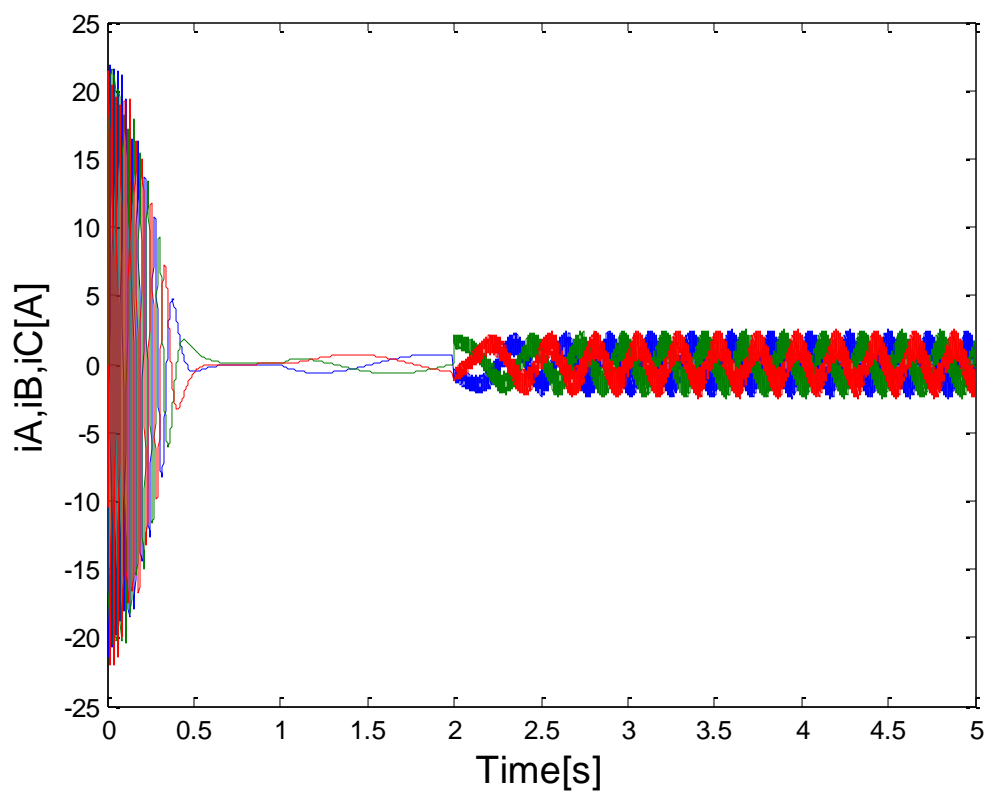


Obr.5.53 Statorové proudy motoru při zátěži $i = 1$ [Nm]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

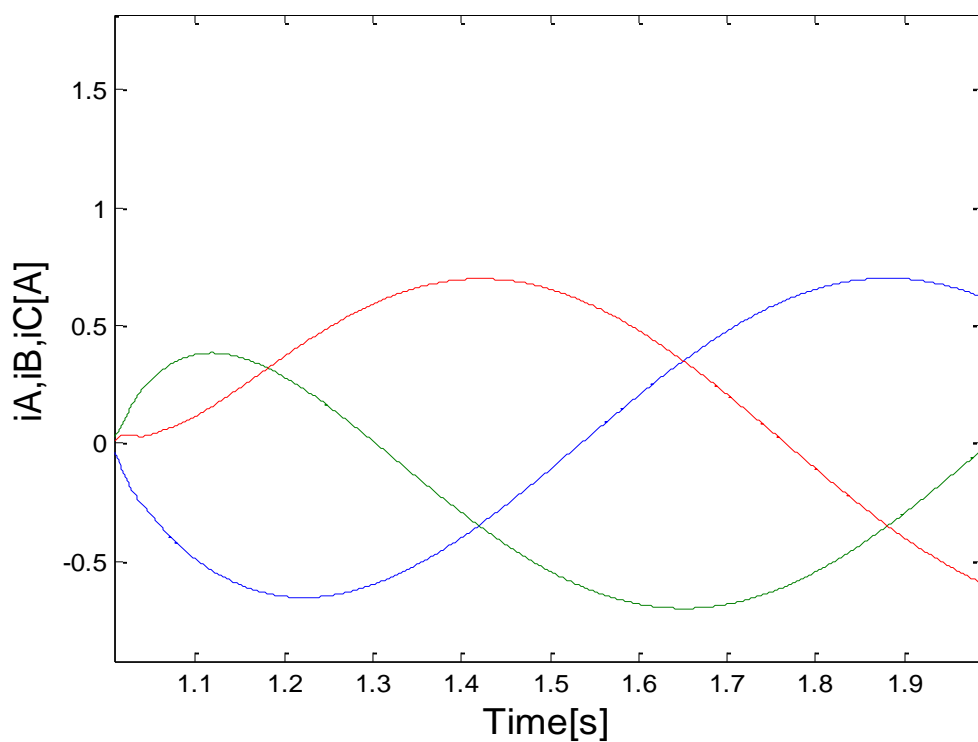


Obr.5.54 Statorové proudy zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 1[Nm]

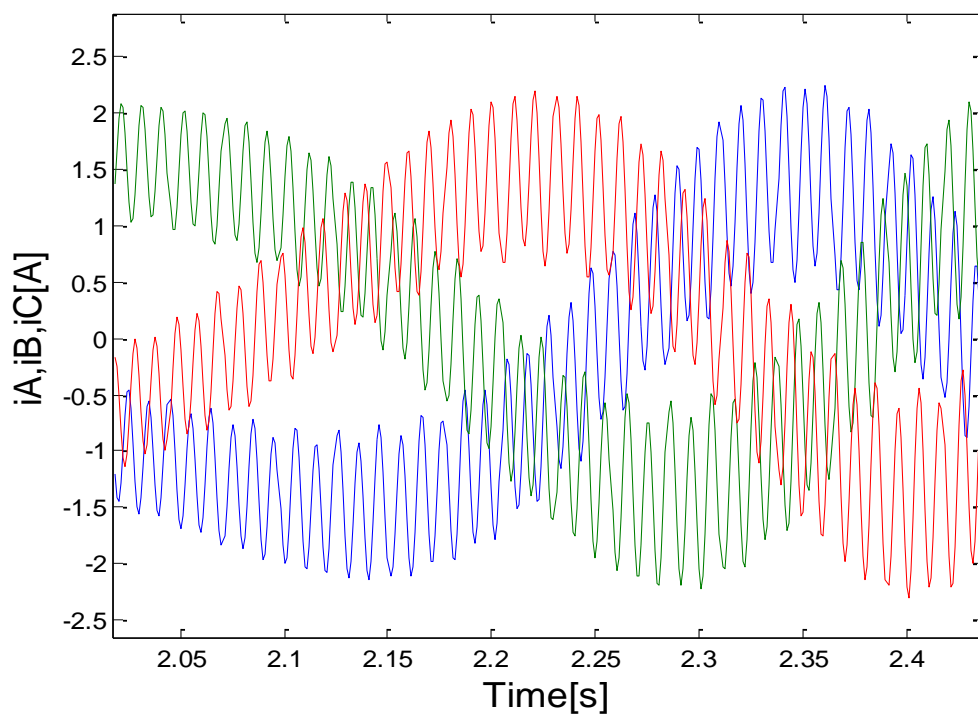


Obr.5.55 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 1(Nm) zátěž motoru začíná v čase[1s]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

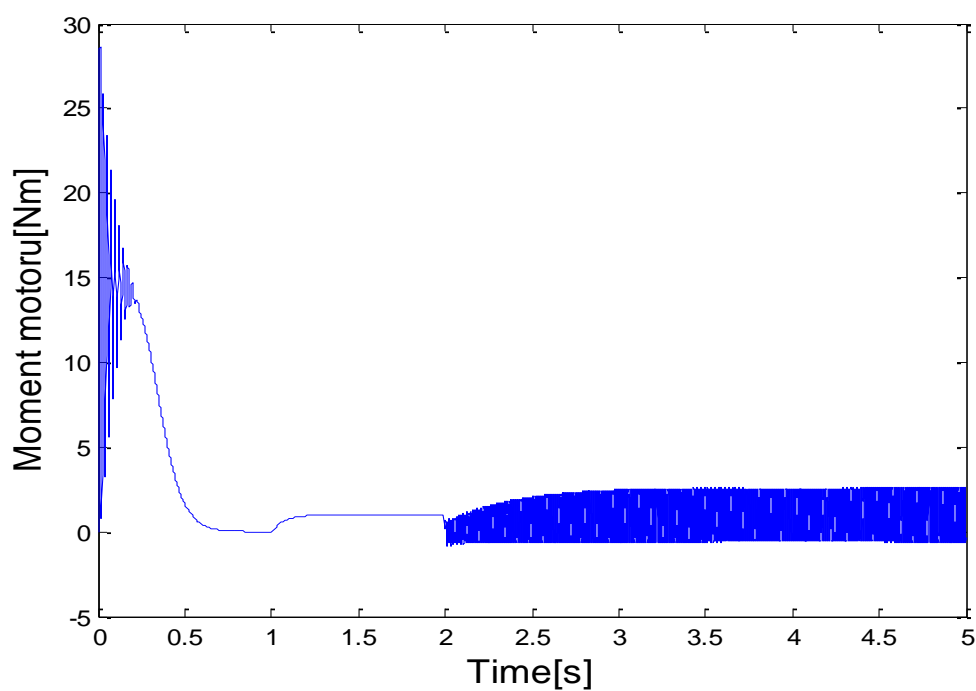


Obr.5.56 Rotorové proudy motoru při zátěži =1[Nm]

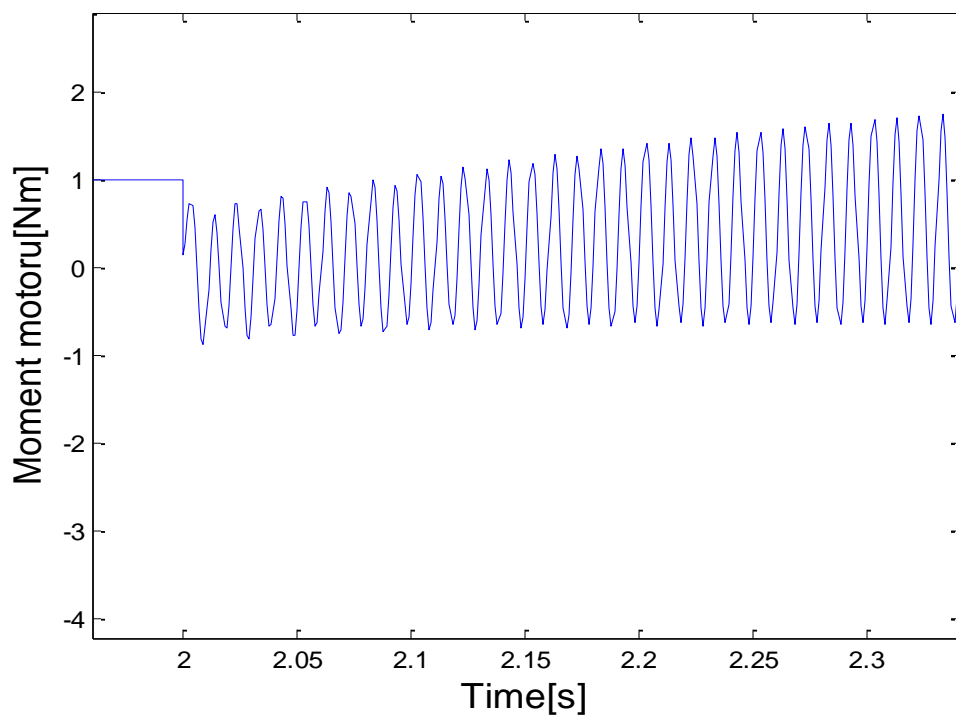


Obr.5.57 Rotorové proudy při zkratu jedné fáze při zátěži =1[Nm]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

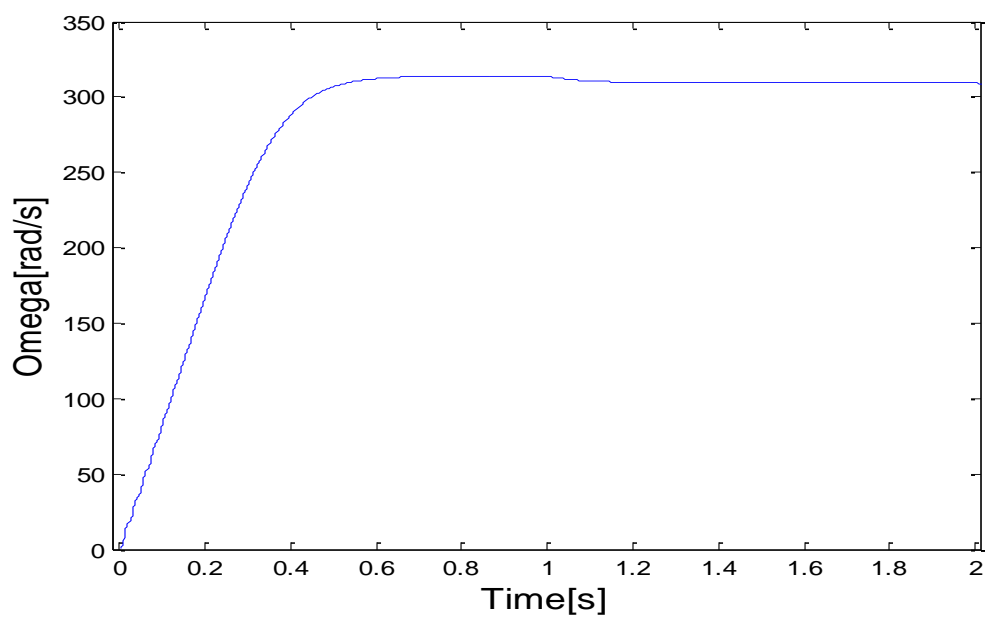


Obr.5.58 Moment při zkratu jedné fáze motoru při zátěži =1(Nm) zátěž motoru začíná v čase(1s)

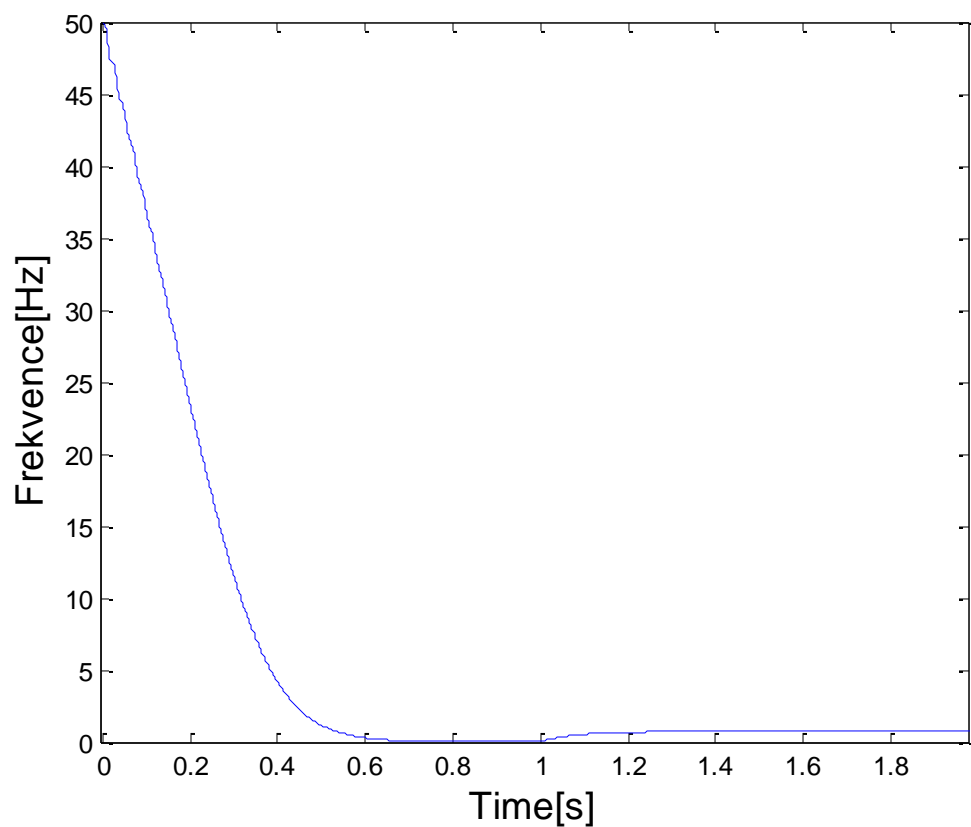


Obr.5.59 Výřez obrázku 5.58

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

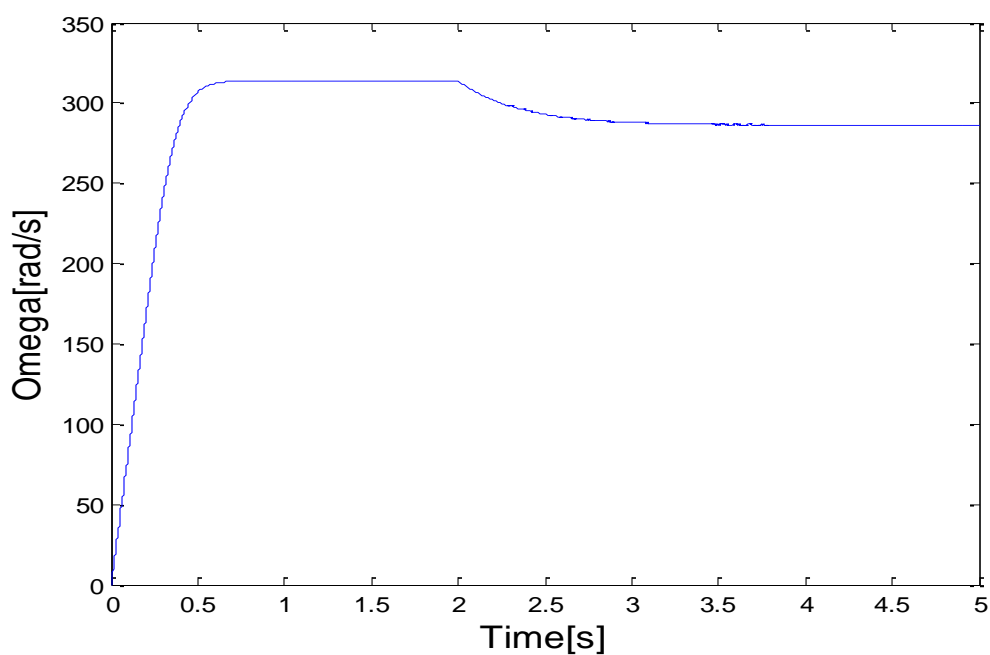


Obr.5.60 Rychlost motoru při zátěži =1[Nm]

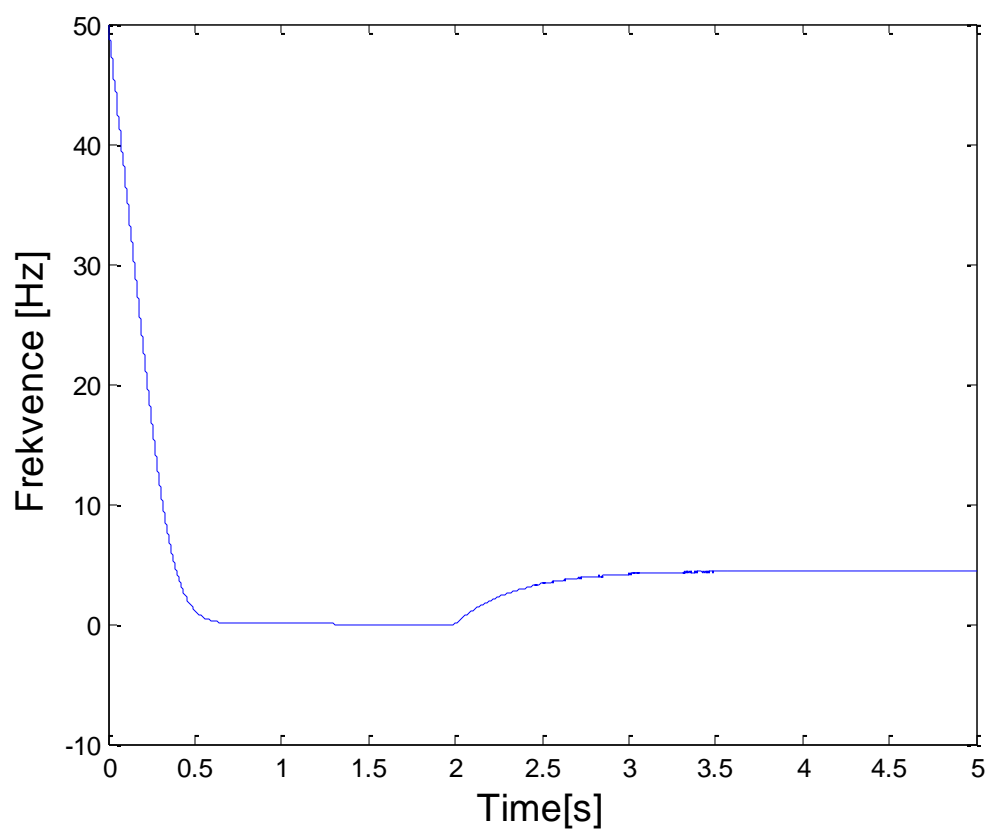


Obr.5.61 Frekvence rotorového napětí motoru při zátěži =1[Nm]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.5.62 Rychlost motoru při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 1[Nm]



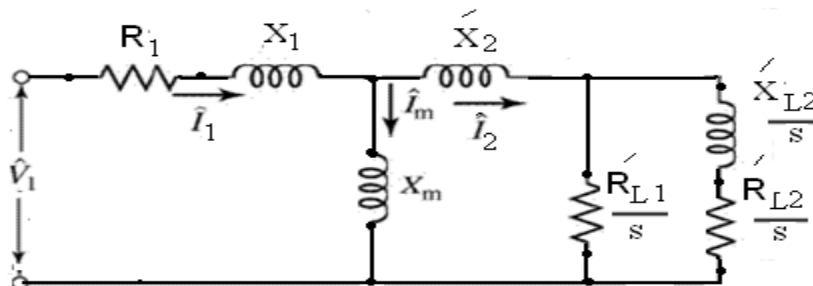
Obr.5.63 Frekvence rotorového napětí při zkratu jedné fáze motoru při zátěži = 1[Nm]

6.OPTIMALIZACE STACIONÁRNÍCH PARAMETRŮ MOTORU POUŽITÍM ALGORITMU UMĚLÉ INTELIGENCE.

Optimalizaci motoru provedenou pro schéma (A) s hlubokou drážkou a pro jednoduché schéma(B), za účelem vysvětlení rozdílu mezi nimi, aby bylo vidět jak matematiké tak i grafické řešení.

6.1.Ekvivalentní schéma motoru

1) Schéma(A)s hlubokou drážkou:-



Obr.6.1.1Schema motoru(A) hlouboká drážka

Naměřené hodnoty motoru jsou uvedeny v Tab. 6.1-1.

Tab.6.1-1 : Naměřené hodnoty motoru

Č.	Rychlost [min ⁻¹]	Moment [Nm]	Skluz	Proud [A]	Cos Fi	Účinnost %	Napětí [V]
1	2399	7,848	20,03333	6,047	0,9385	0,505434	398,49
2	2580,4	7,3575	13,98667	5,078	0,9341	0,608979	398,79
3	2655,6	6,867	11,48	4,598	0,9294	0,649261	398,57
4	2702,6	6,3765	9,913333	4,208	0,9249	0,672523	399,46
5	2743,3	5,886	8,556667	3,822	0,919	0,698466	399,35
6	2773,6	5,3955	7,546667	3,502	0,9119	0,712557	398,79
7	2803,7	4,905	6,543333	3,205	0,9016	0,722409	399,64
8	2831,7	4,4145	5,61	2,911	0,8874	0,733035	400,47
9	2854,7	3,924	4,843333	2,638	0,8705	0,739491	400,11
10	2876,4	3,4335	4,12	2,386	0,8467	0,741167	400,11
11	2897,2	2,943	3,426667	2,161	0,8162	0,733319	399,88
12	2916,4	2,4525	2,786667	1,936	0,7722	0,725499	400,03
13	2932,9	1,962	2,236667	1,752	0,7129	0,697932	400,42
14	2953,2	1,4715	1,56	1,571	0,6159	0,679519	400,72
15	2967,8	0,981	1,073333	1,453	0,5111	0,593041	400,97
16	2996,5	0,0981	0,116667	1,333	0,2286	0,145891	401

Pro toto schéma motoru platí následující rovnice k řešení parametrů motoru:

$$U_t = \frac{jx_m}{jx_m + jx_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (6.1)$$

$$Z_t = \frac{jx_m (R_1 + jx_1)}{(jx_m + jx_1 + R_1)} \cdot U_{av} \quad (6.2)$$

$$Z_s = \frac{\left(\left(\frac{R_{L2}}{s} + jx_{L2}\right)(R_{L2} + \frac{R_{L2}}{s} + jx_2)\right)}{\left(\left(\frac{R_{L2}}{s} + jx_{L2}\right) + (R_{L2} + \frac{R_{L2}}{s} + jx_2)\right)} \cdot U_{av} \quad (6.3)$$

$$Z_{eval} = |Z_s + Z_t| \quad (6.4)$$

$$I_{comp} = \frac{U}{Z_{eval}} \quad (6.5)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{U_t}{\left(\frac{R_{L2}}{s} + \frac{R_{L2}}{s} + jx_2\right)} \quad (6.6)$$

$$Z_{eval} = (R_1 + jx_1) + \frac{jx_m \cdot Z_s}{(jx_m + Z_s)} \quad (6.7)$$

$$P_{2eval} = \left| 3 \cdot \hat{I}_2^2 \cdot (1-s) \cdot \frac{R_{L2}}{s} \right| \quad (6.8)$$

$$M_{eval} = \frac{60}{2\pi n} \quad (6.9)$$

$$\eta_{eval} = \left| \frac{3 \cdot \hat{I}_2^2 \cdot (1-s) \cdot \frac{R_{L2}}{s}}{3 \cdot U \cdot \cos\varphi} \right| \quad (6.10)$$

Kde:

U_t je "Theveninovo" napětí

U_{av} je střední hodnota napětí

Z_t je t"Theveninová" impedance

Z_{eval} je totální vypočítaná impedance

I_{comp} je komplexní složka proudu statoru

\hat{I}_2 rotorový proud spočítán z statoru

P_{2eval} výstupní vypočítaný výkon motoru

M_{eval} výstupní vypočítaný moment motoru

η_{eval} vypočítaná účinnost motoru

Cílová funkce

$K_1=45$, $K_2=25$, $K_3=50$, koeficienty cílové funkce

$$F_{obj} = K_1 \cdot \sum \left(\frac{I}{I_{mod}} - 1 \right)^2 + K_2 \cdot \sum \left(\frac{\cos I}{\cos \varphi} - 1 \right)^2 + K_3 \cdot \sum \left(\frac{\eta_{eval}}{\eta} - 1 \right)^2 \dots \dots \dots (6.11)$$

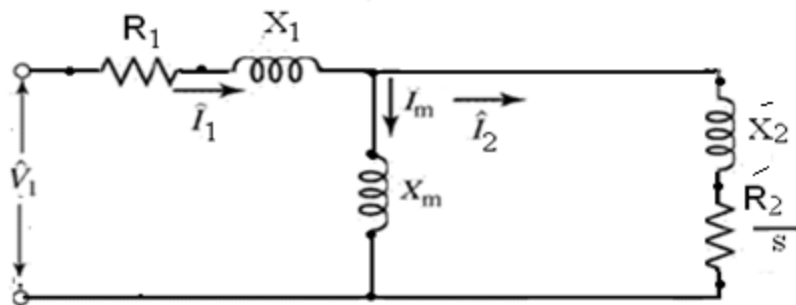
Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Průběhy změn jednotlivých parametrů podle metody diferenciální evoluce jsou uvedeny v Tab. 6.1-2.

Tab. 6.1-2: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma [A] v závislosti na čase.

	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	2	2	125
2	0.0002204	15.36	21.18	11.63	21.08	16.04	2.31	175.2
3	0.0003306	22.57	11.3	5.79	8.27	15.53	22.85	205.1
4	0.0004408	2.35	23.56	5.16	17.18	8.87	13.86	157
5	0.000551	16.94	6.15	4.75	17.33	24.15	16.61	213.1
6	0.0006612	9.56	24.86	5.75	11.29	19.88	57.5	159.2
7	0.0007714	13.48	25	6.04	1	27.02	21.12	159.6
8	0.0008816	19.39	10.03	5.24	5.84	30	35.96	172.4
9	0.0009918	14.85	17.1	5.02	2.11	28	14.76	152.1
10	0.001102	22.65	10.03	5.38	1	28	22.72	166.4
11	0.0012122	13.15	19.86	5.46	1	28	17.35	195.1
12	0.0013224	12.81	20.17	5.12	1	26.94	20.09	159.3
13	0.0014326	13.13	19.59	5.48	1	28	10.06	173.5
14	0.0015428	12.65	20.15	5.47	1	24.1	25	171.5
15	0.001653	16.12	17.65	5.2	1	28	24.59	169
16	0.0017632	13.48	16.94	5.62	1	24.1	25	181.7
17	0.0018734	15.08	17.93	5.38	1	27.22	25	172.8
18	0.0019836	13.83	18.4	5.41	1	26.58	23.51	169.9
19	0.0020938	11.91	17.79	5.49	1	24.59	15.52	176.5
20	0.002204	13.66	16.59	5.37	1	25.46	16.71	175.3
21	0.0023142	14.17	16.62	5.39	1	26.13	9.4	174.8
22	0.0024244	14.03	16.73	5.37	1	26.49	10.48	176.1
23	0.0025346	14.24	15.8	5.36	1	26.36	3.71	176.9
24	0.0026448	13.6	16.56	5.38	1	25.32	11.3	175.4
25	0.002755	13.21	17.09	5.36	1	26.09	1	174.8
26	0.0028652	13.45	16.39	5.4	1	25.49	1	175.5
27	0.0029754	13.24	16.38	5.39	1	25.33	1	176.1
28	0.0030856	13.64	16.52	5.36	1	26.32	2.32	175.9
29	0.0031958	13.69	16.32	5.36	1	25.98	5.91	176.3
30	0.003306	13.28	16.81	5.39	1	25.7	1	175.2
31	0.0034162	13.21	16.35	3.38	1	25.66	1	176.6
32	0.0035264	13.45	16.42	5.39	1	25.83	1	175.5
33	0.003639	13.31	16.51	5.37	1	25.71	1	176.1
34	0.0037468	13.35	16.59	5.37	1	25.99	1	175.8
35	0.003857	13.28	16.61	5.38	1	25.74	1	175.8
36	0.0039672	13.31	16.53	5.38	1	25.86	1	176.1
37	0.0040774	13.29	16.62	5.38	1	25.81	1	175.8
38	0.0041876	13.37	16.5	5.38	1	25.83	1	175.8
39	0.0042978	13.38	16.46	5.38	1	25.81	1	176.1
40	0.004408	13.34	16.5	5.38	1	25.83	1	176.1
41	0.0045182	13.34	16.52	5.38	1	25.81	1	176.1
42	0.0046284	13.34	16.52	5.38	1	25.82	1	176.1
43	0.0047386	13.34	16.52	5.38	1	25.82	1	176.1
44	0.0048488	13.33	16.53	5.38	1	25.82	1	176.1
45	0.004959	13.33	16.53	5.38	1	25.82	1	176.1

Schéma(B) jednoduchá:-



Obr.6.1.2Schéma motoru(B) jednoduchá

Pro toto schéma motoru platí následující rovnice k řešení paramtetrů motoru:-

$$Z_{eval} = \frac{R_2 + jx_2 + (jx_m \cdot (\frac{R_2}{s} + jx_2))}{(jx_m + \frac{R_2}{s} + jx_2)} \quad (6.12)$$

$$I_{cplx,eval} = \frac{U_{av}}{Z_{eval}} \quad (6.13)$$

$$I_{eval} = |I_{cplx,eval}| \quad (6.14)$$

$$\cos\varphi_{eval} = \frac{\text{real}(Z_{eval})}{|Z_{eval}|} \quad (6.15)$$

$$\sin\varphi_{eval} = \frac{\text{imag}(Z_{eval})}{|Z_{eval}|} \quad (6.16)$$

$$I_{re,eval} = \text{real}(I_{cplx,eval}) \quad (6.17)$$

$$I_{im,eval} = \text{imag}(I_{cplx,eval}) \quad (6.18)$$

$$P_{1eval} = \text{real}(3 \cdot U_{av} \cdot I_{re,eval}) \quad (6.19)$$

$$\varphi_{eval} = \frac{180}{\pi} \cdot \text{atan}\left(\frac{I_{im,eval}}{I_{re,eval}}\right) \quad (6.20)$$

$$U_t = \frac{jx_m}{jx_m + jx_1 + R_1} \cdot U_{av} \quad (6.21)$$

$$Z_t = \frac{jx_m (R_2 + jx_2)}{(jx_m + jx_1 + R_1)} \cdot U_{av} \quad (6.22)$$

$$\hat{I}_2 = \frac{U_t}{(\frac{R_2}{s} + jx_2)} \quad (6.23)$$

$$P_{2eval} = \left| 3 \cdot \hat{I}_2^2 \cdot (1-s) \cdot \frac{R_2}{s} \right| \quad (6.24)$$

$$M_{eval} = \frac{60}{2\pi n} \cdot P_{2eval} \quad (6.25)$$

$$I = \frac{U}{Z_{eval}} \quad (6.26)$$

$$\eta_{eval} = \left| \frac{3 \cdot \hat{I}_2^2 \cdot (1-s) \cdot \frac{R_2}{s}}{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi} \right| \quad (6.27)$$

Kde:

U_t je "Theveninovo" napětí

U_{av} je střední hodnota napětí

Z_t je "Theveninova" impedance

Z_{eval} je totální vypočítaná impedance

I_{cplx} je komplexní složka proudu statoru

\hat{I}_2 rotorový proud spočítán z statoru

$P_{2\ eval}$ výstupní vypočítaný výkon motoru

M_{eval} výstupní vypočítaný moment motoru

η_{eval} vypočítaná účinnost motoru

I_{eval} vypočítaná hodnota statorového proudu

$I_{re,eval}$ je reální vypočítaná složka proudu statoru

$I_{im,eval}$ je imaginární vypočítaná složka proudu statoru

Cílová funkce

$K1=10$, $K2=30$, $K3=15$, koeficienty cílové funkce

$$F_{obj} = K1 \cdot \sum \left(\frac{I}{I_{mod}} - 1 \right)^2 + K2 \cdot \sum \left(\frac{\cos I}{\cos \varphi} - 1 \right)^2 + K3 \cdot \sum \left(\frac{\eta_{eval}}{\eta} - 1 \right)^2 \dots \dots \dots (6.28)$$

Průběhy změn jednotlivých parametrů podle metody diferenciální evoluce jsou uvedeny v Tab. (6.1-3).

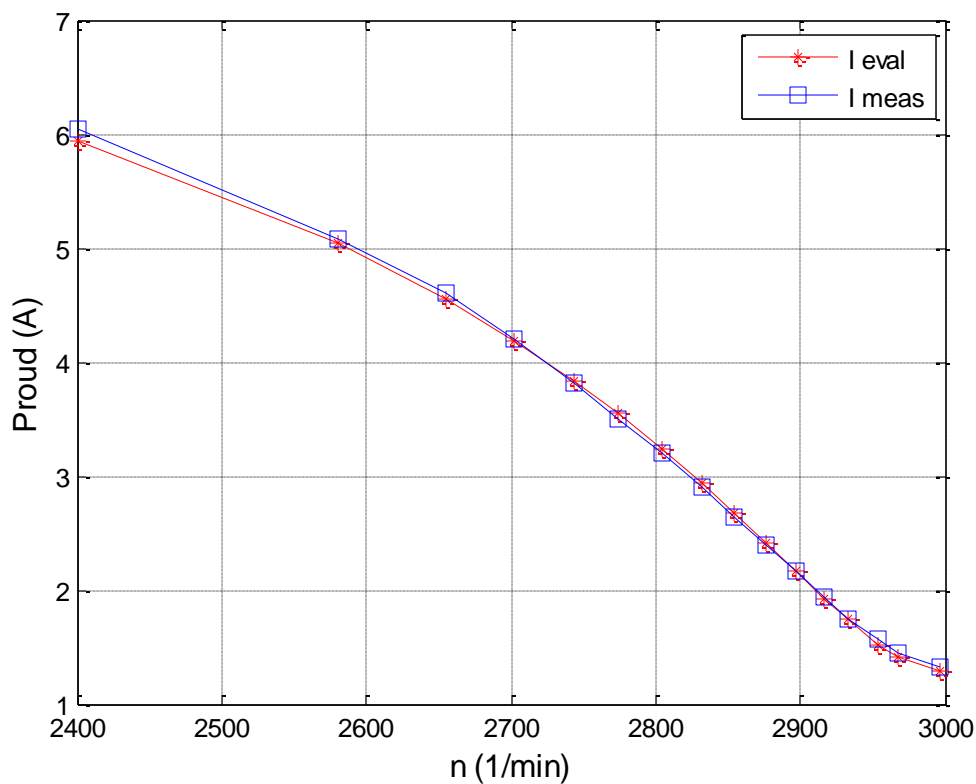
Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab.6.1-3: Průběhy změn parametrů motoru podle diferenciální evoluce pro schéma[B] v závislosti na čase.

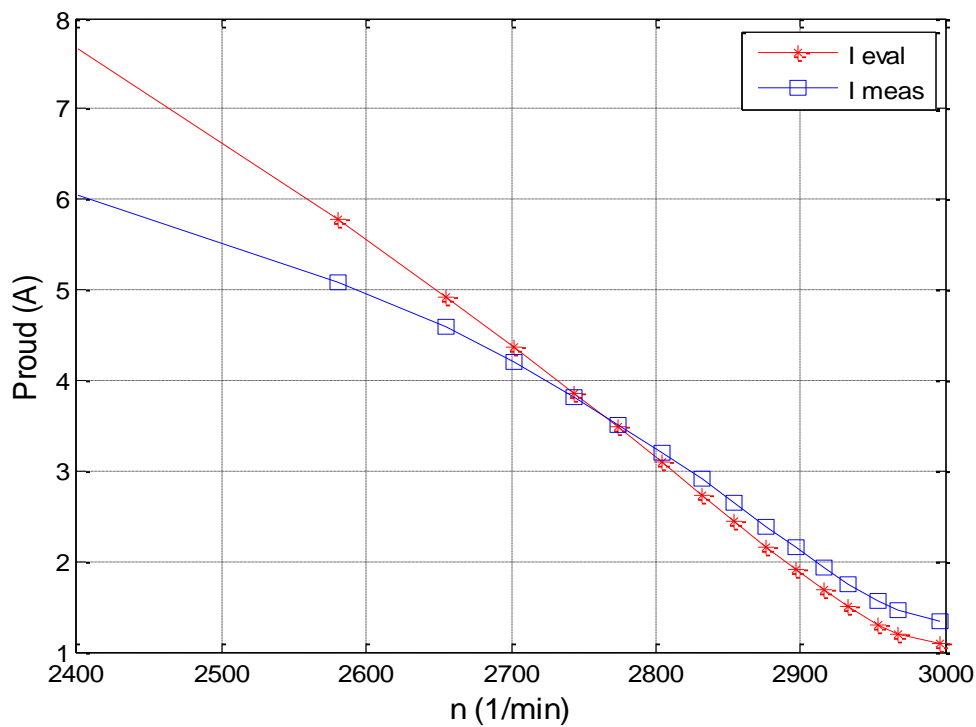
	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	101
2	0.0002204	1	3	7.56	1	100
3	0.0003306	21.59	5.56	1	1	293.3
4	0.0004408	9.63	7.84	11.75	1	300
5	0.000551	11.1	6.07	4.47	7.03	300
6	0.0006612	9.63	5.35	4.47	3.95	274.6
7	0.0007714	9.63	5.15	1	6.97	274.6
8	0.0008816	2.65	5.55	1	4.56	206.7
9	0.0009918	3.44	5.08	1	1	177.1
10	0.001102	4.54	4.4	3.26	6.69	210.3
11	0.0012122	6.06	4.72	6.07	4.22	228.3
12	0.0013224	6.06	4.61	6.05	4.66	232.3
13	0.0014326	5.66	4.56	3.08	3.98	205.5
14	0.0015428	6.34	4.72	5.33	1.18	209
15	0.001653	6.42	4.64	6.65	1.14	216.4
16	0.0017632	5.87	4.73	2.29	1.18	197.7
17	0.0018734	6.68	4.51	4.24	1	204.7
18	0.0019836	6.34	4.65	6.43	1	212.5
19	0.0020938	6.96	4.66	1.87	1.11	203
20	0.002204	6.96	4.76	1	1	200.9
21	0.0023142	5.7	4.71	5.51	1	206.6
22	0.0024244	5.8	4.67	4.86	1	203.8
23	0.0025346	5.99	4.64	5.98	1	208.2
24	0.0026448	5.95	4.61	5.03	1	202.5
25	0.002755	6.16	4.65	4.87	1	204.7
26	0.0028652	6.16	4.65	4.87	1	204.7

Výsledky řešení podle diferenciální evoluce jsou graficky kreslené takovým způsobem ,aby bylo vidět rozdíl mezi naměřené hodnoty(meas) a vypočítané hodnoty(eval).

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.6.1.3 Input current magnitude(vstupní magetizační proud)

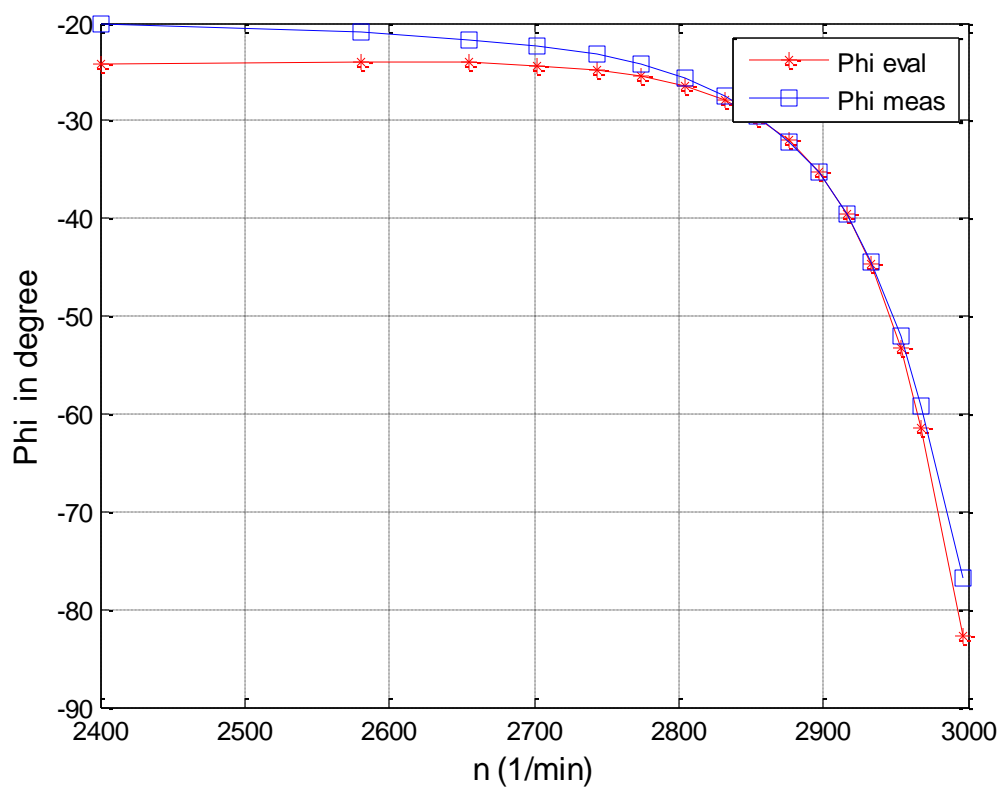


sch.A

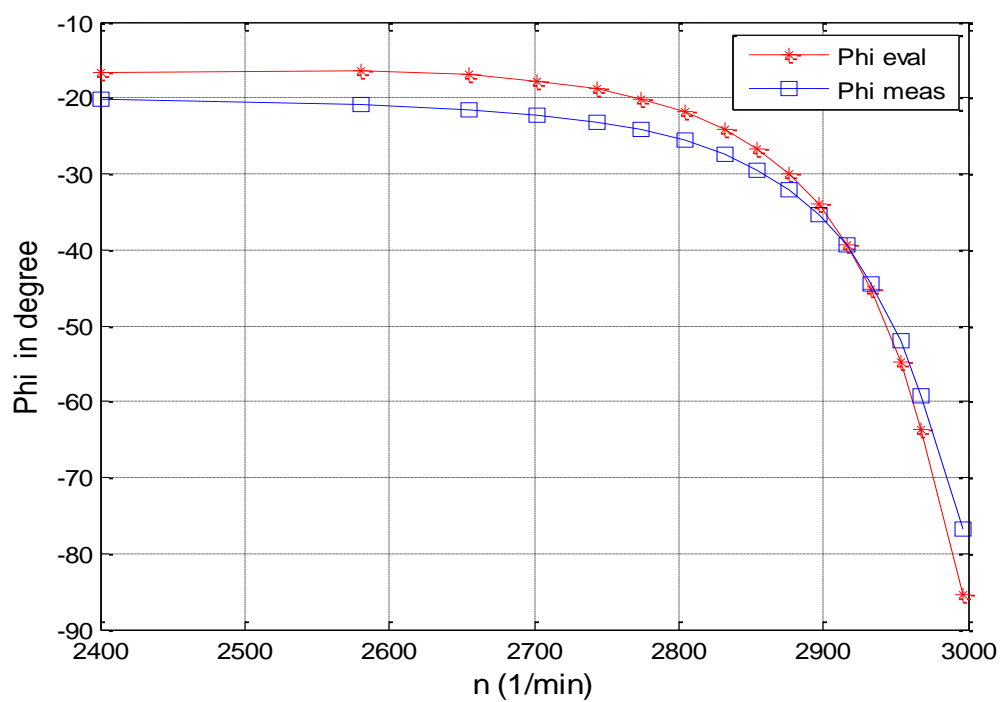
br.6.1.4 Input current magnitude(vstupní magetizační proud) sch.B

O

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

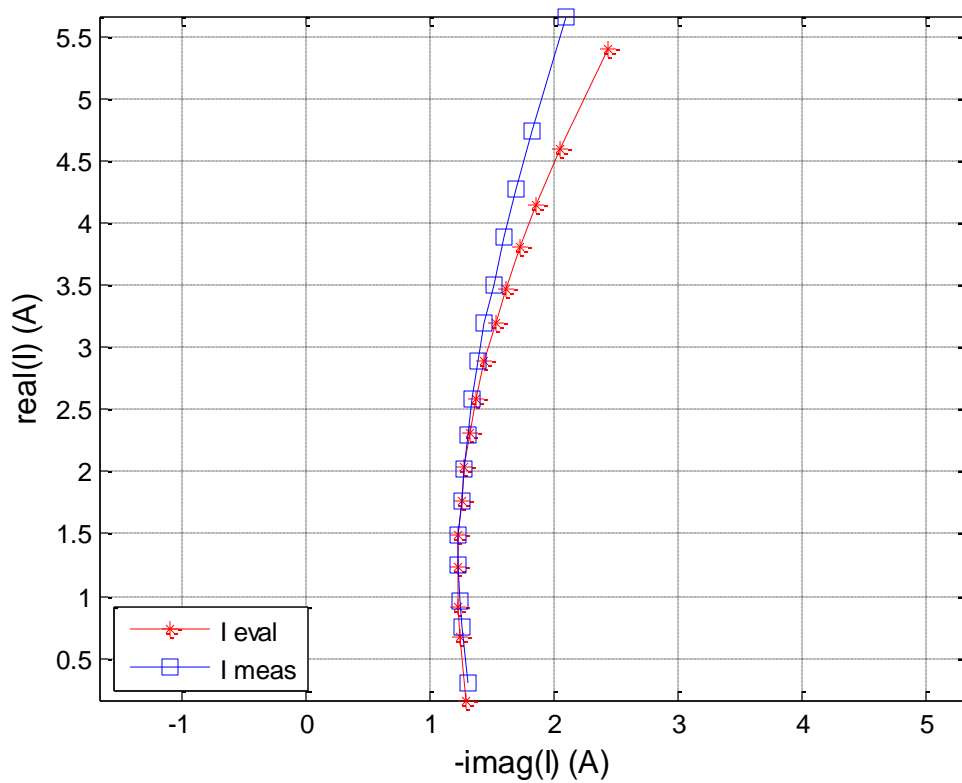


Obr.6.1.5 Cos ϕ - sch.A

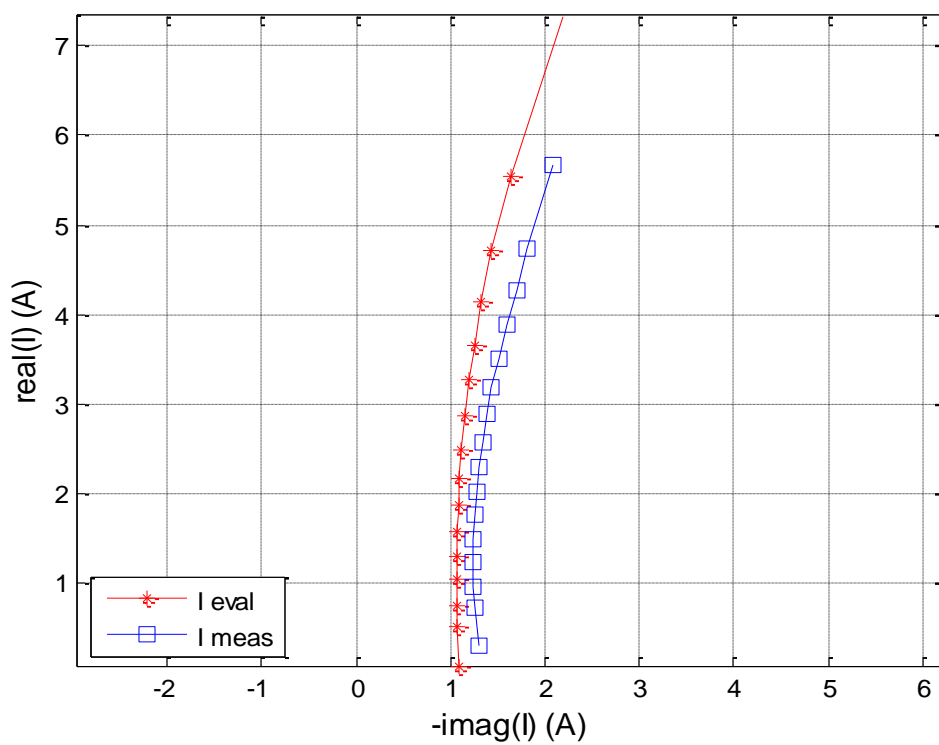


Obr.6.1.6 Cos ϕ sch.B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

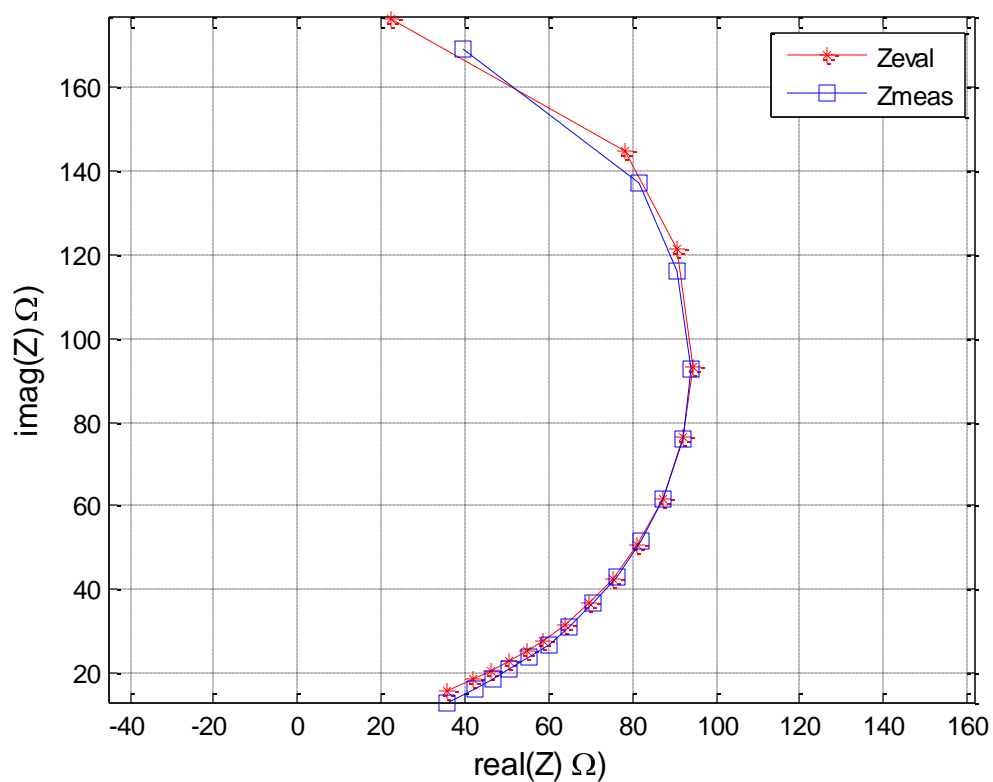


Obr.6.1.7 Komplexní proud statoru sch.A

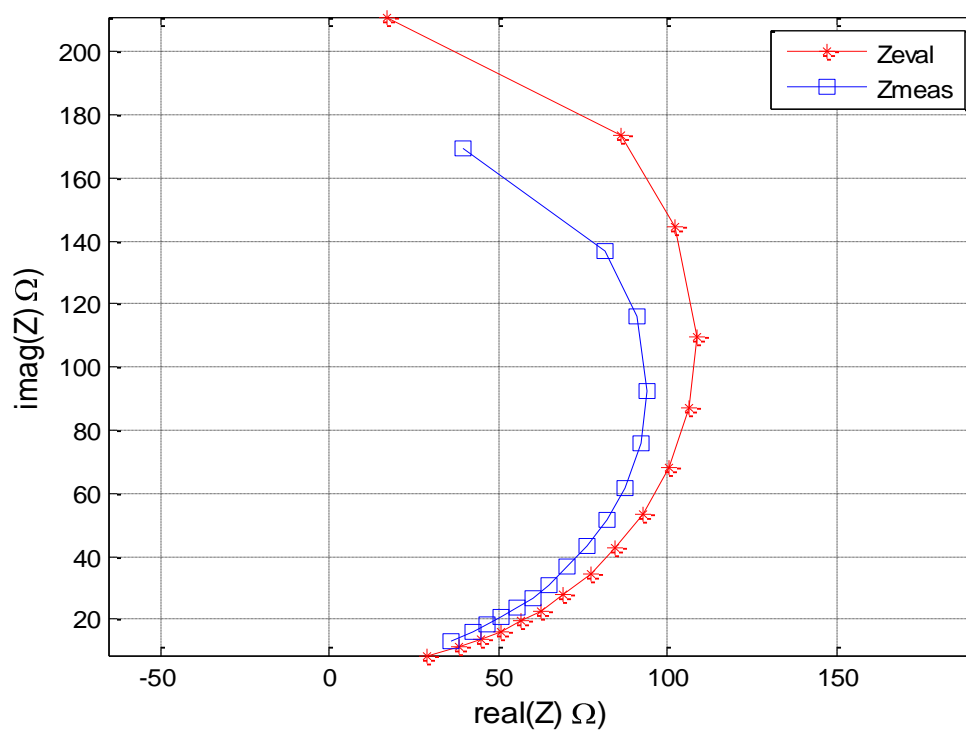


Obr.6.1.8 Komplexní proud statoru sch.B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

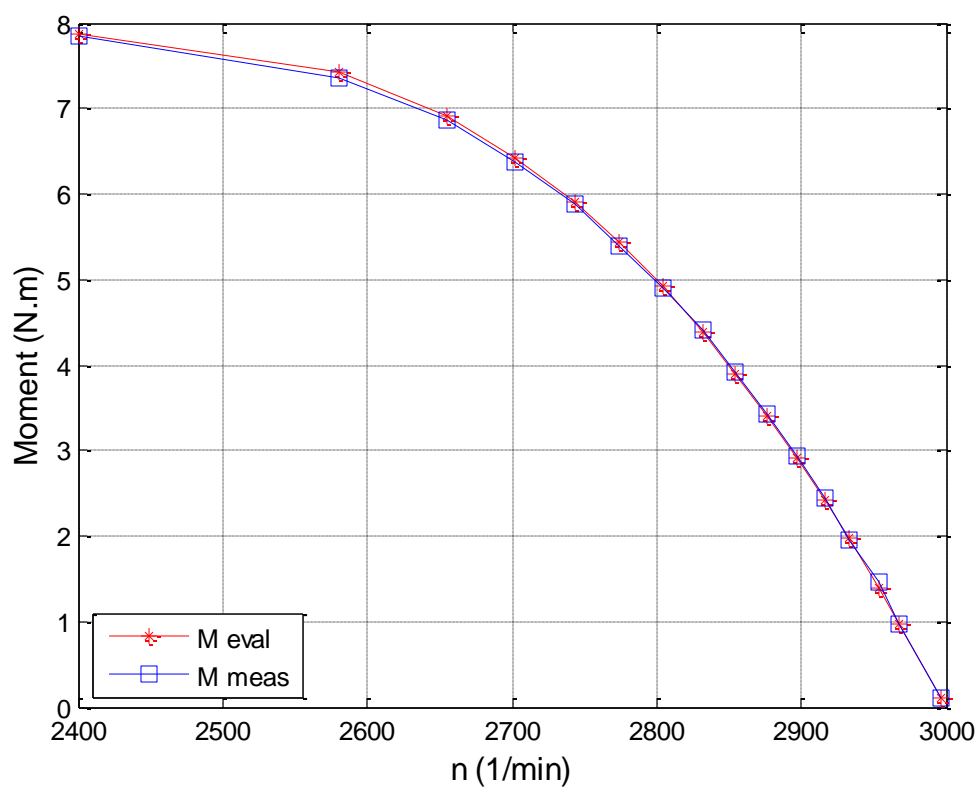


Obr.6.1.9 Impedance jedné fáze motoru sch.A

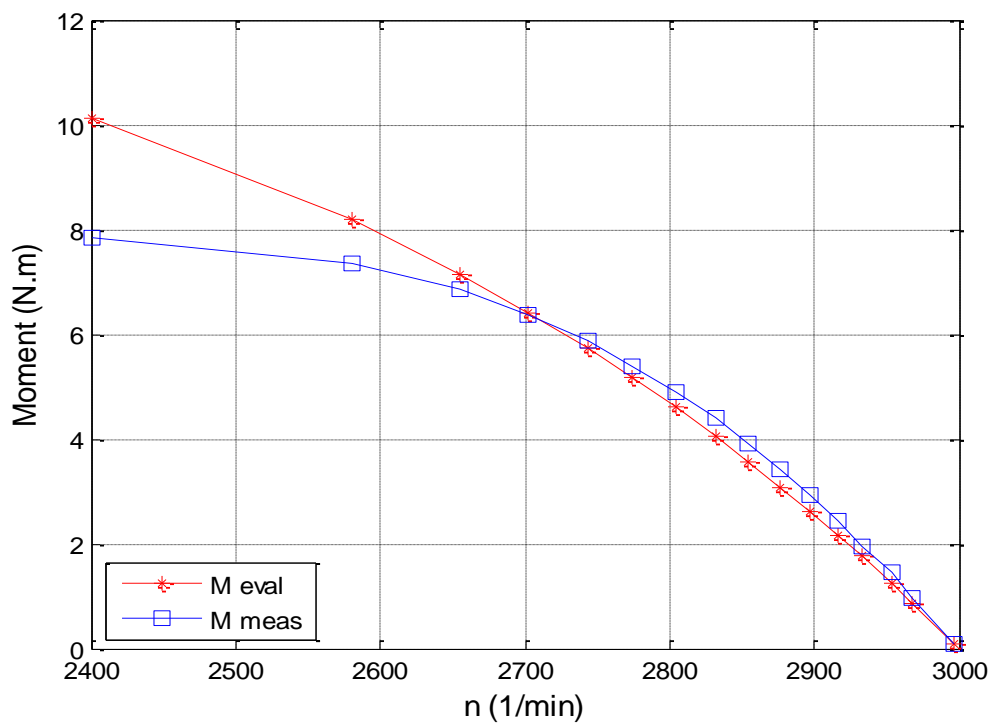


Obr.6.1.10 Impedance jedné fáze motoru sch.B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

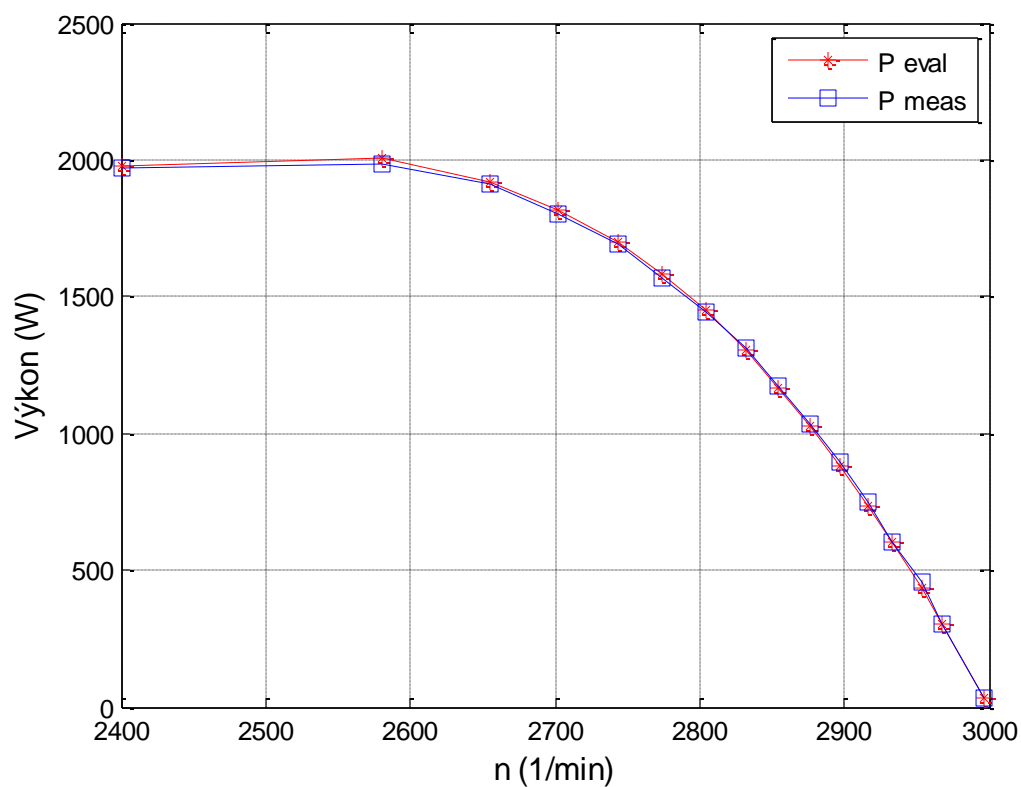


Obr.6.1.11 Moment motoru sch.A

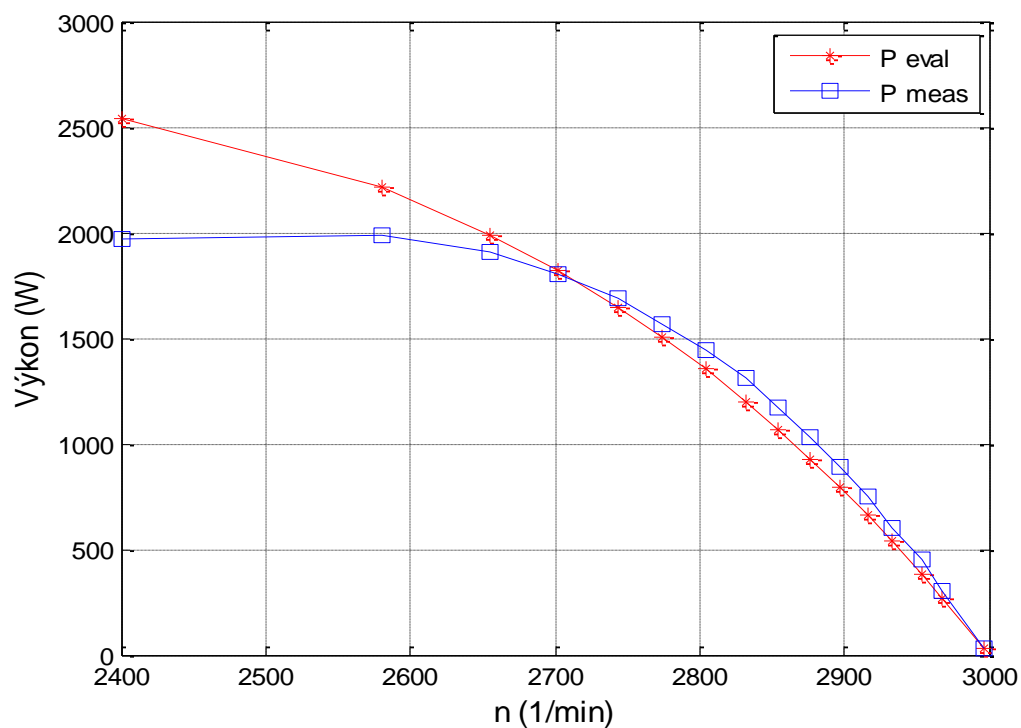


Obr.6.1.12 Moment motoru sch.B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

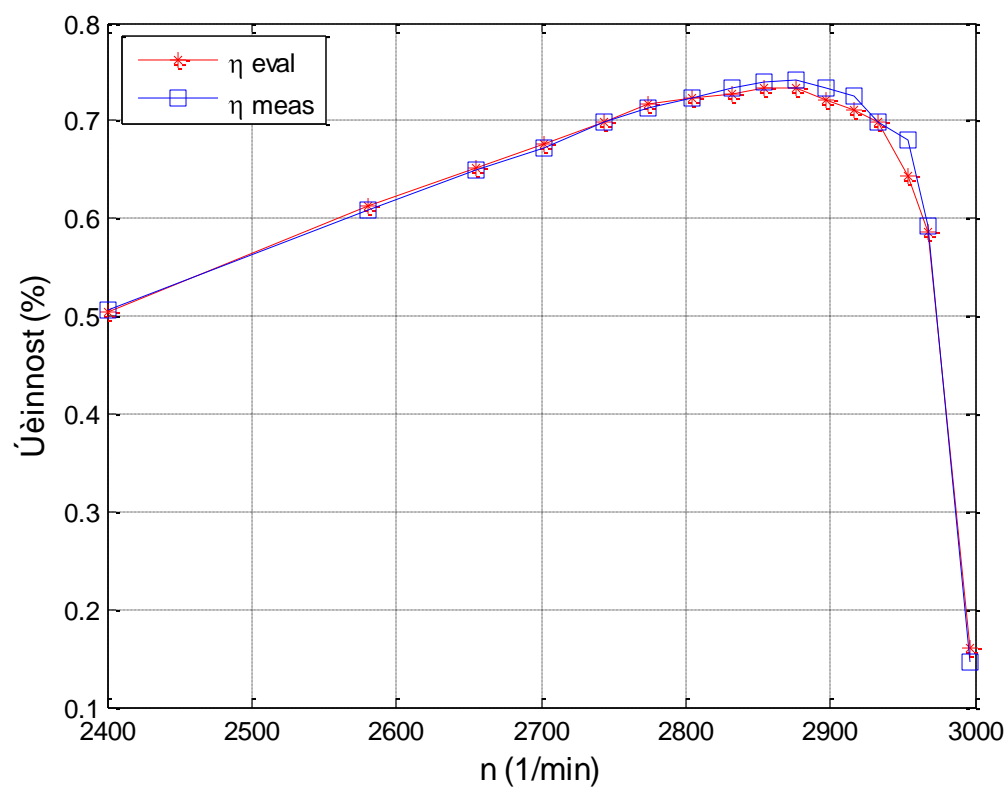


Obr.6.1.13 Výkon motoru sch.A

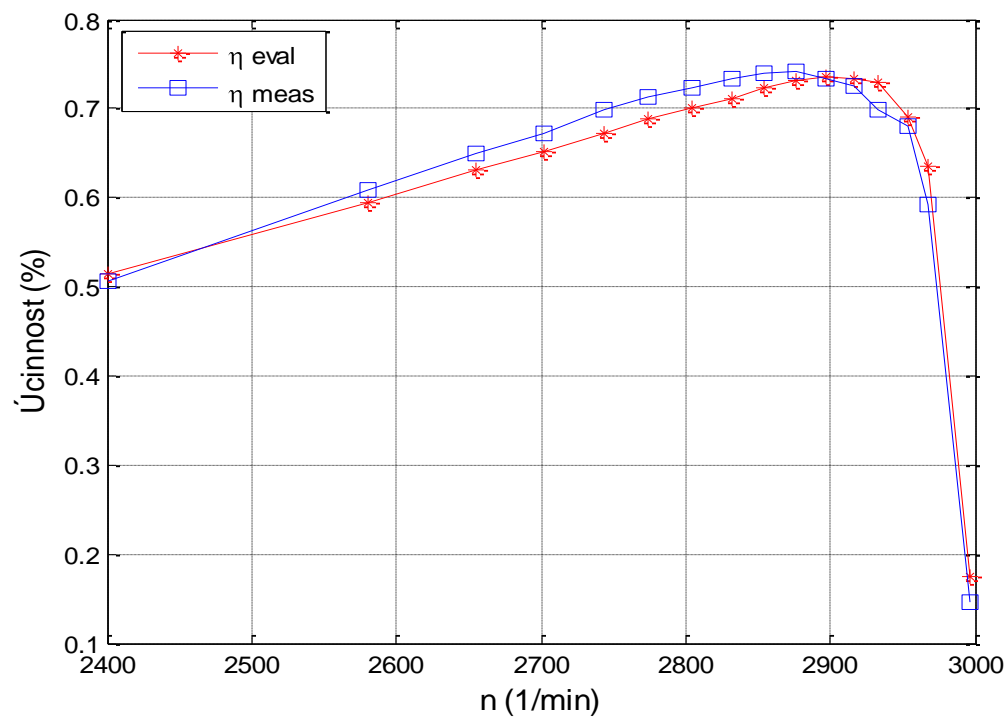


Obr.6.1.14 Výkon motoru sch.B

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.6.1.15 Účinnost motoru sch.A



Obr.6.1.16 Účinnost motoru sch.B

7. OPTIMALIZACE DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ MOTORU POUŽITÍM ALGORITMU UMĚLÉ INTELIGENCE.

7.1 Stručný technický popis optimalizační metody

Diferenciální Evoluce(DE). je jedním z nejlepších typů genetických algoritmů pro řešení problémů se skutečnou hodnotu proměnné. V DE je každá proměnná hodnota reprezentována reálným číslem. Nejlepší výhody DE jsou jednoduchá struktura, snadné použití, rychlost a robustnost. Může být definována jako vývojově skvělý nástroj, který je okamžitě dostupný pro praktické aplikace. Navíc ji lze použít v několika aplikacích vědy a inženýrství a zjistit účinná řešení problémů téměř neřešitelných bez odborných znalostí nebo složitých konstrukcí algoritmů. Je-li systém svolný k racionálnímu vyhodnocování, DE může poskytnout prostředky pro extrahování nejlepšího možného výkonu. Diferenční evoluce používá jako vyhledávací mechanismus a výběr mutace přímého vyhledávání směrem k perspektivní oblasti v regionu proveditelných. Genetické algoritmy vygenerují posloupnost populace pomocí výběrových mechanismů. Zatímco genetické algoritmy používají křížení mutace jako vyhledávací mechanismy. Hlavní rozdíl mezi genetickým algoritmem a diferenční evolucí je, že genetický algoritmus spoléhá na křížení, mechanismus pravděpodobnostní a užitečnou výměnu informací mezi řešením a najití lepšího řešení, zatímco evoluční strategie používá jako primární vyhledávací mechanismus mutací.

Začátkem této práce jsem předvedl výhody použití AM motoru v průmyslu. Motor se častěji používá jako pohonná jednotka, protože má velkou spolehlivost, je málo poruchový a ve srovnání s ostatními pohony je levnější. Kvůli těmto vlastnostem začaly pokusy pro zlepšení jeho vlastností. Pokusy se dělají proto, aby se zmenšila cena motoru nebo zvýšil moment motoru a nebo pro zmenšení elektrického proudu, který motor spotřebuje. Dále také pro zlepšení jeho dynamických vlastností atd. aby motor mohl pracovat spolehlivě v různých těžkých podmínkách.

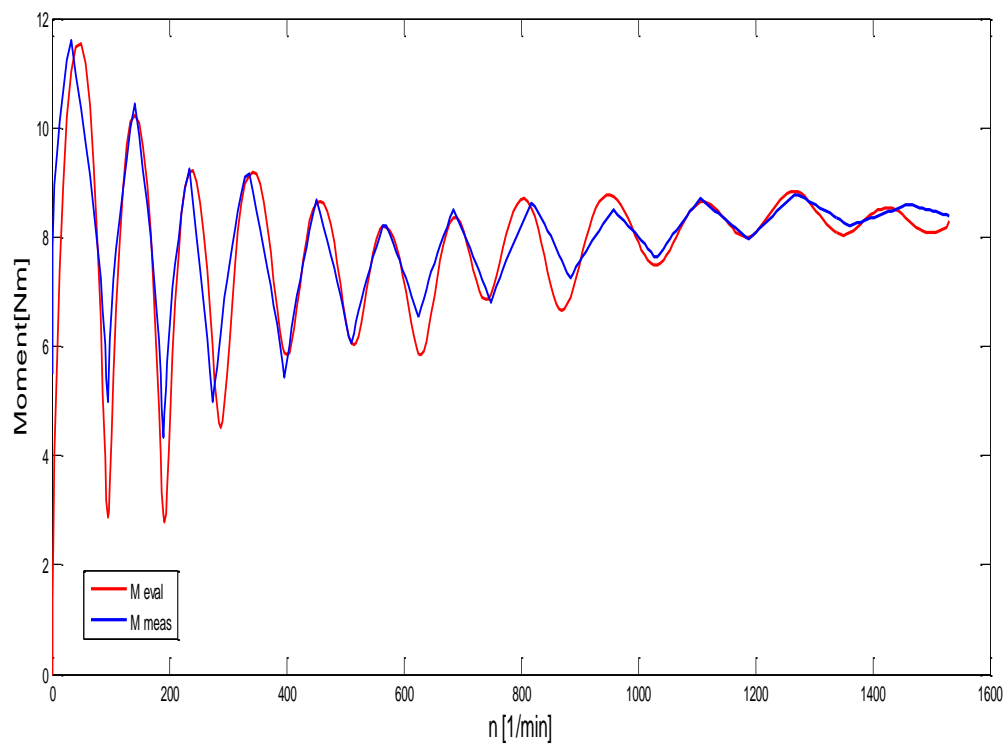
7.1.1 Odhad parametrů motoru v laboratoři

Při odhadu následné optimalizací jsme dospěli k závěru, konstantní hodnoty parametrů motoru, odpovídají pouze pro ustálený stav. Pro přechodný děje jako rozběh motoru je nutné uvažovat proměnné parametry v čase. Na základě toho jsem řešil proměnné hodnoty parametrů ve vybraných časových úsecích přechodného děje (rozběh motoru). Výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.1-1.

Tab. 7.1-1: Parametry motoru

Čas.intervál[s]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_m [Ω]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]
0.0109	5.1496	7.0964	133.9524	12.6	5
0.0219	3.2342	4.8670	131.2520	11.2	3.6
0.032	3.3912	3.9878	131.0008	8.5	5.2
0.042	3.3912	4.4902	133.0104	12	4.7
0.053	3.7052	4.3018	129.6820	12	4.2
0.06	3.3912	3.7994	132.0056	12	4.1
0.0737	3.1714	3.2656	145.2250	11	4.6
0.085	3.3912	2.0096	134.0152	12.2	3.4
0.096	2.9516	2.3550	136.4330	10	4
0.1068	3.3912	2.7004	138.0030	11.8	3.8
0.1185	3.5796	3.2028	140.7976	10	4.9
0.1298	3.8308	3.2342	139.5730	12.6	4.7
0.142	3.3912	3.4540	129.9960	12	4
0.154	3.3912	2.7004	132.0056	11.5	4.8
0.1663	3.3912	2.1980	140.9860	11.9	4.3
0.179	3.3912	1.7898	142.9956	12	4.6
0.192	3.1400	1.6642	139.2590	12.7	4.95
0.2048	3.3912	2.0096	138.0030	12	4.7
0.218	3.3912	2.2922	134.9886	12	4.9
0.232	3.3912	2.5120	132.0056	12	5.2
0.2455	3.3912	2.0096	136.9982	12	5.3
0.261	3.4854	1.7898	138.9136	12.5	5.4
0.278	3.8308	2.3550	139.5730	12.4	5.2
0.295	3.3912	1.4130	141.9908	12.7	5.3

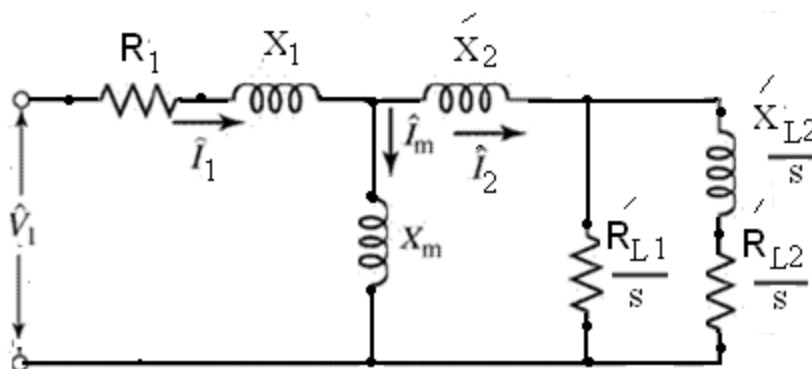
Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr. 7.1.2 Rozběh motoru podle Simulinku

7.2 Proces optimalizace

V této kapitole pro optimalizaci dynamických parametrů budeme používat stejnou metodu provedenou v kapitole 6 (DE). Pro tento účel budeme používat následující schéma ukázané na Obr. (7.2.1) k vypočítání parametrů motoru.



Obr.7.2.1 Schéma optimalizovaného motoru

- R_1 : statorový činný odpor
- X_1 : Statorová Reaktance
- X_m : hlavní (magnetizační) reaktance
- R_{L2} : rotorový odpor
- R_{L1} : rotorový odpor
- X_2 : rotorová reaktance
- x_{L2} : rotorová reaktance
- s : skluz

V kapitole (6) bylo vidět , že motor má lepší parametry,když je s hlubokou drážkou , z toho důvodu se optimalizace dynamických parametrů provádí pro schéma motoru s hlubokou drážkou. Naměřené hodnoty tohoto schéma jsou uvedeny v Tab. 7.2-1 .

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 7.2-1: Naměřené hodnoty optimalizovaného motoru

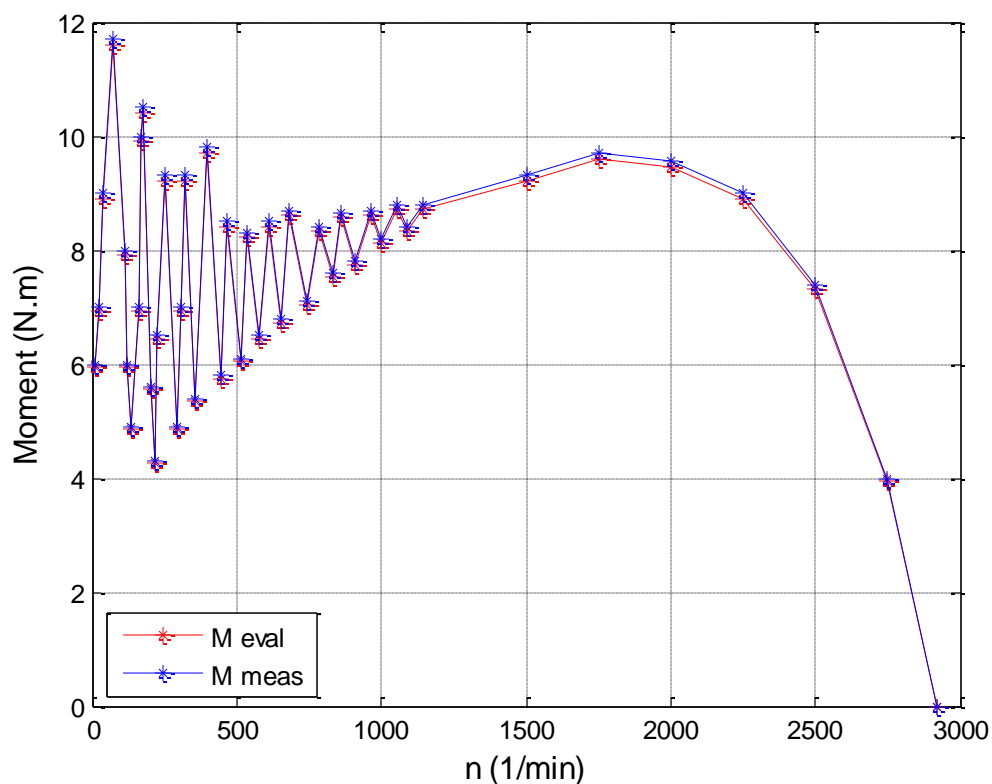
Č.	Rychlost [min ⁻¹]	Moment [Nm]	Skluz [%]	Napětí [V]
1	12.82	6	099.57	398,49
2	25.64	7	099.15	398,79
3	38.64	9	098.71	398,57
4	70.51	11.7	097.65	399,46
5	115.38	8	096.15	399,35
6	121.79	6	95.94	398,79
7	134.61	4.9	095.51	399,64
8	160.25	7	094.66	400,47
9	166.66	10	094.44	400,11
10	173.07	10.5	094.23	400,11
11	205.12	5.6	93.16	399,88
12	217.94	4.3	092.74	400,03
13	224.35	6.5	092.52	400,42
14	249.99	9.3	091.67	400,72
15	294.86	4.9	090.17	400,97
16	307.68	7	089.74	401
17	320.5	9.3	089.32	401
18	358.96	5.4	088.03	401
19	397.42	9.8	086.75	401
20	448.7	5.8	085.04	401
21	467.93	8.5	084.40	401
22	516.8	6.1	082.77	401
23	538	8.3	082.07	401
24	576	6.5	080.80	401
25	615	8.5	079.50	401
26	653	6.8	078.23	401
27	679.46	8.7	077.35	401
28	743	7.1	075.23	401
29	782.12	8.4	073.93	401
30	833.3	7.6	072.22	401
31	858.94	8.65	071.37	401
32	910.22	7.8	069.66	401
33	961.5	8.7	067.95	401
34	999.96	8.2	066.67	401
35	1051.24	8.8	064.96	401
36	1089.7	8.4	063.68	401
37	1140.98	8.8	061.97	401
38	1500	9.3	050.00	401
39	1750	9.7	041.66	401
40	2000	9.55	033.33	401
41	2250	9	25	401
42	2500	7.4	016.67	401
43	2750	4	8.3	401
44	2923.33	0	2.56	401

Výsledky optimalizace jsou v tabulkách a graficky znázorněny podle přesnosti.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 7.2-2: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [99%]

	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0002724375	2	2	2	2	2	2	125
2	0.000544875	11.99;	11.93	11.63	8.53	5.67	1.53	122.6
3	0.0008157312	13.49	6.58	5.79	3.73	5.84	22.85	131.5
4	0.00108975	13.47	13.49	6.58	3.47	5.59	7.09	121.7
5	0.0013621875	12.03	11.96	5.07	3.14	8.72	17.75	146.7
6	0.0016346125	10.68	11.9	5.75	1	10	24.92	142.8
7	0.0019070625	11.32	14	3.4	6.26	10	2.5	119.7
8	0.0021795	11.62	14	4.5	6.13	9.07	5.88	145.9
9	0.0024519375	10.5	14	4.32	7.71	9.07	1	160
10	0.0002724375	10.36	14	3.82	5.15	9.4	20.2	129.1
11	0.0029968125	11.35	14	2.39	10	9.81	24.06	119.1
12	0.00326925	12.33	14	2.71	10	9.76	25	133.5
13	0.0035416875	9	14	2.18	10	9.73	14.96	113.6
14	0.003814125	9	11.43	2.64	10	9.64	10.57	141
15	0.0040865625	11.7	12.54	5.35	1	10	23.9	110.7
16	0.004359	9	10.49	4.79	1	10	25	100

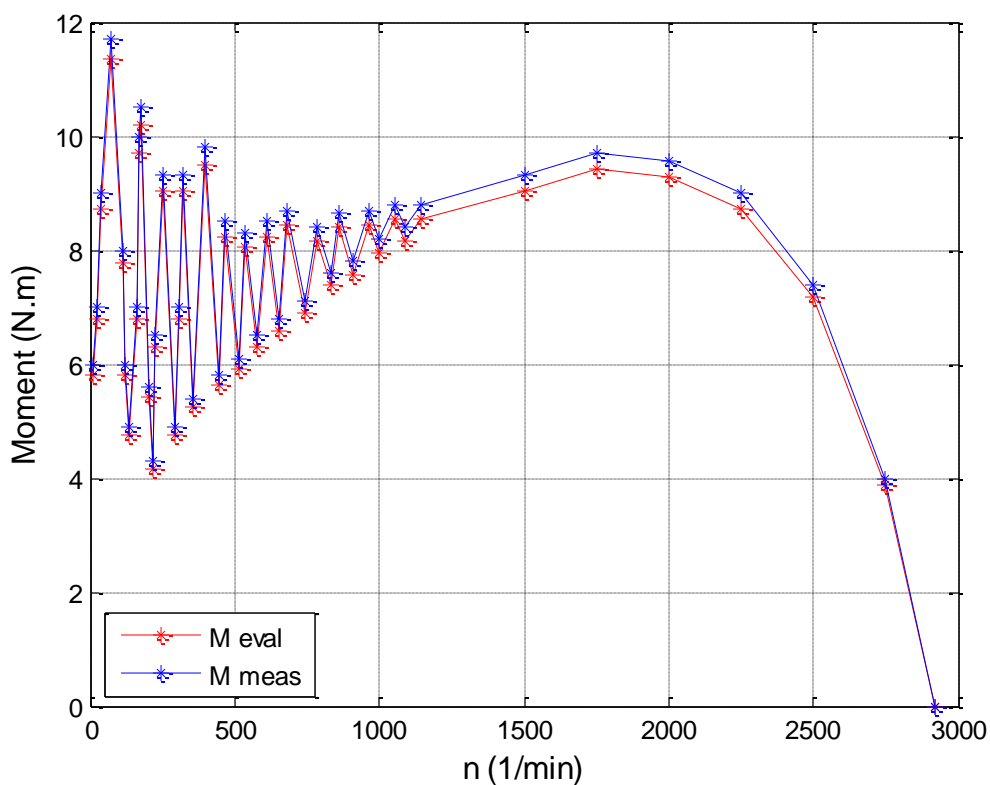


Obr. 7.2.2 Moment optimalizovaného motoru s přesností [99%]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 7.2-3: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [97%]

	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	2	2	125
2	0.0002204	11.99;	11.93	11.63	8.53	5.67	1.53	122.6
3	0.0003306	13.49	6.58	5.79	3.73	5.84	22.85	131.5
4	0.0004408	13.47	12.7	23.54	3.47	5.59	7.09	121.7
5	0.000551	12.03	11.96	5.07	3.14	8.72	17.75	146.7
6	0.0006612	11.53	8.66	3.43	4.6	7.17	14.43	112.3
7	0.0007714	10.68	11.9	5.75	1	10	24.92	142.8
8	0.0008816	9.6	10.48	4.83	1.91	8.84	25	140.8
9	0.0009918	10.53	14	5.82	1.47	10	25	160
10	0.001102	12.06	14	6.79	1	9.94	15.97	160
11	0.0012122	11.59	14	8.63	1	9.4	3.4	159.6
12	0.0012122	11.59	14	8.63	1	9.4	3.4	159.6

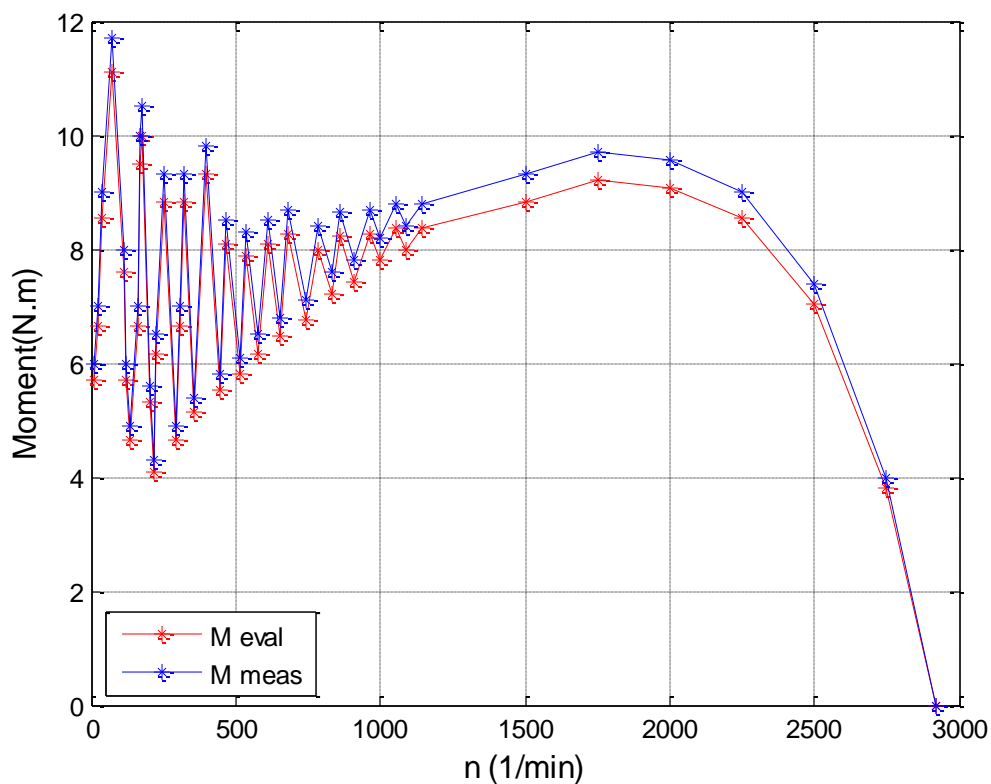


Obr. 7.2.3 Moment optimalizovaného motoru s přesností [97%]

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

Tab. 7.2-4: Průběhy změn jednotlivých parametrů motoru s přesností [95%]

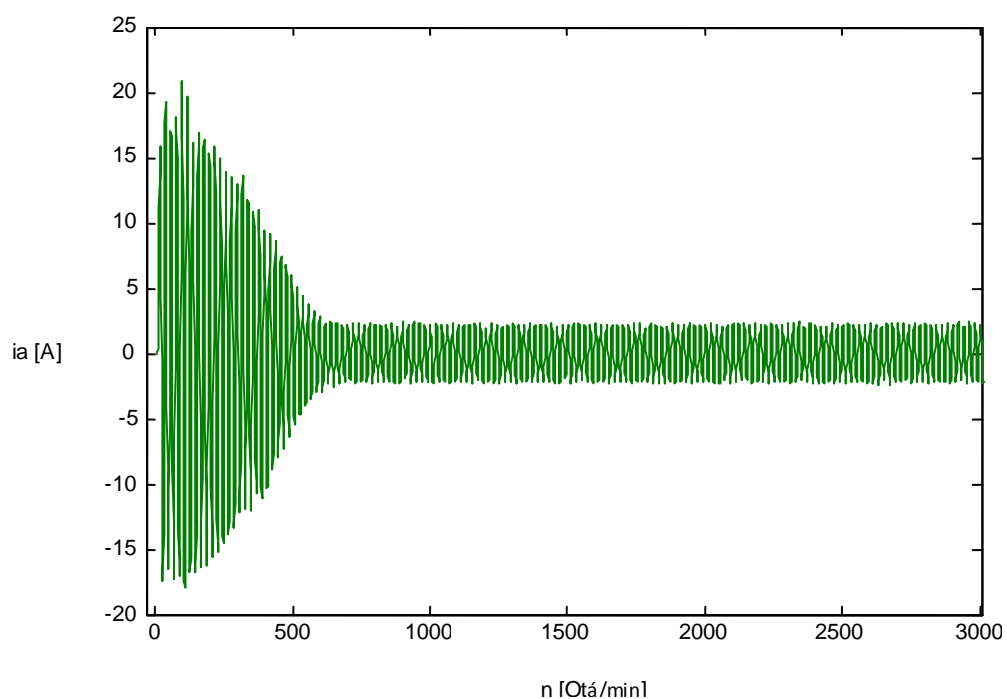
	Čas.interval[s]	R_1 [Ω]	R_{L1} [Ω]	R_{L2} [Ω]	x_1 [Ω]	x_2 [Ω]	x_{L2} [Ω]	x_m [Ω]
1	0.0001102	2	2	2	2	2	2	125
2	0.0002204	13.49	6.58	5.79	3.73	5.84	22.85	131.5
3	0.0003306	13.47	12.7	23.54	3.47	5.59	7.09	121.7
4	0.0004408	12.03	11.96	5.07	3.14	8.72	17.75	146.7
5	0.000551	11.53	8.66	3.43	4.6	7.17	14.43	112.3
6	0.0006612	12.5	9.12	4.53	4.47	9.07	5.88	142.8
7	0.004168	11.37	1	3.25	2.23	3.41	1.86	103.8



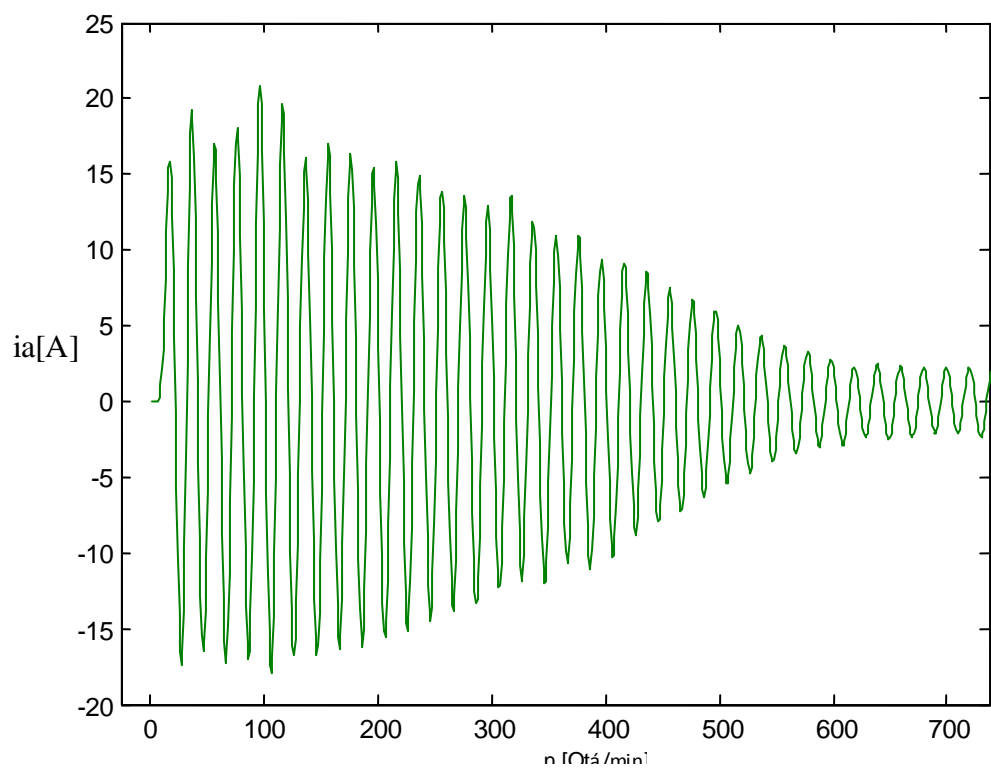
Obr. 7.2.4 Moment optimalizovaného motoru s přesností [95%]

Proud v případě proměnných parametrů se také mění v srovnání s konstantními parametry a je vidět na obrázcích (7.2.5) a (7.2.8) a jejich výřezy.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

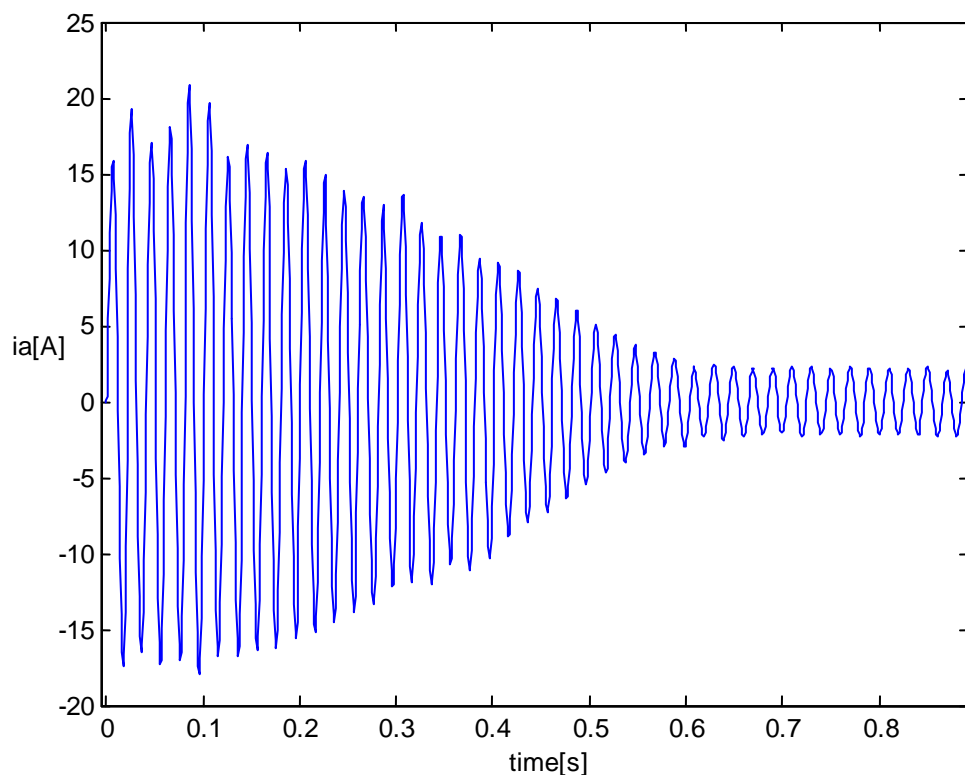


Obr.7.2.5 Proud jedné fáze s proměnnými parametry.

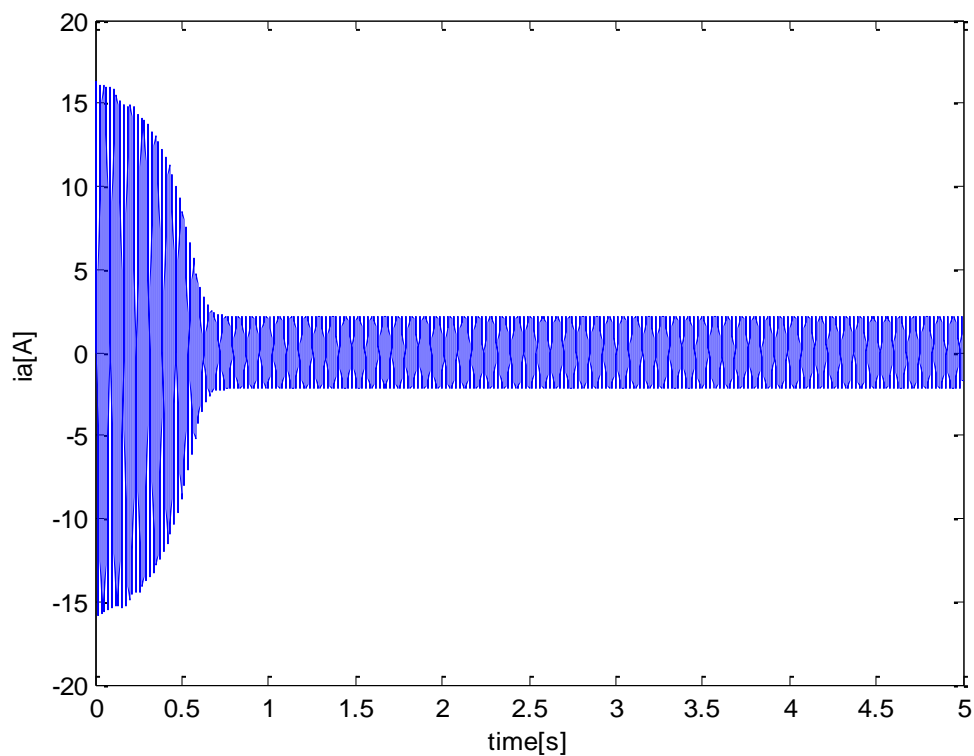


Obr.7.2.6 Výřez obr.7.2.5 proud jedné fáze s proměnnými parametry v závislosti na otáčkách.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru

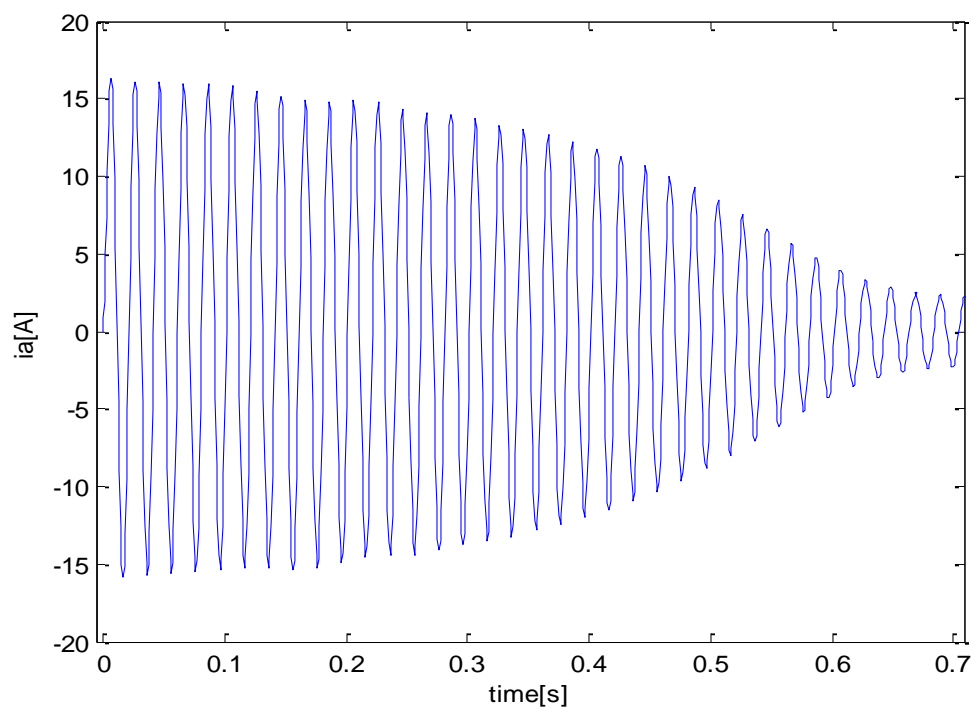


Obr.7.2.7 Výřez obr.7.2.5 proud jedné fáze s proměnnými parametry v závislosti na čase.

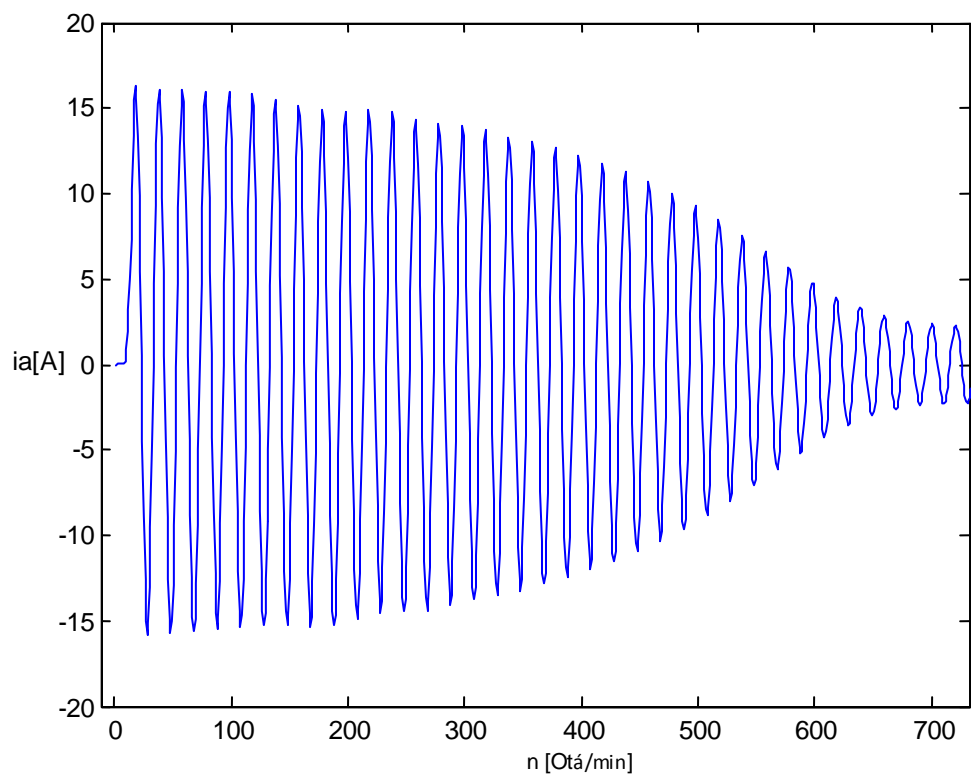


Obr.7.2.8 Proud jedné fáze s konstantními parametry.

Optimalizace parametrů asynchronního motoru



Obr.7.2.9 Výřez obr.7.2.8 proud jedné fáze s konstantními parametry v závislosti na čase.



Obr.7.2.10 Výřez obr.7.2.8 proud jedné fáze s konstantními parametry v závislosti na otáčkách.

8. ZÁVĚR:-

Cílem disertační práce byla optimalizace parametrů asynchronního motoru. Pro tento účel byl odvozen matematický model asynchronního motoru. Tento matematický model byl odvozen takovým způsobem, aby přesně popisoval chování motoru. Tento odvozený model byl posléze aplikován v simulinku Matlab. Simulace mi potom umožnila získat grafické znázornění parametrů motoru, které popisují chování motoru v určitých podmínkách. Jako optimalizační metodu jsem zvolil a používal algoritmus diferenciální evoluce. Tato volba byla učiněna s vědomím mnoha pozitiv, jež přinesla. Algoritmus diferenciální evoluce patří časově rozhodně k nejnovějším typům algoritmů. Její obecný princip je již vyjádřen v jejím názvu, tedy ve slovu evoluční. Díky revolučnímu principu evoluce v případě tohoto algoritmu, kde rodiče plodí potomky, jež podléhají mutaci a dále cyklicky se zbavuje rodičů a nevhodných potomků a pouze z lepších potomků jsou dále rodiče je možno dosáhnout kýženého cíle a dost zásadních výhod. Mezi ty nejzásadnější patří jednoduchost programování, rychlost dané metody, velmi přesné výsledky a kupříkladu i schopnost se vypořádat s některými patologickými jevy některých funkcí. Teoreticky tedy můžeme algoritmus diferenciální evoluce zařadit k umělé inteligenci.

Výsledky optimalizací jsou vždy přesně vyjádřeny číselně v konkrétních tabulkách anebo v grafickém znázornění. První částí práce bylo zpracování matematického modelu, který popisuje parametry motoru v Simulinku- Matlab. Tento model byl nutným požadavkem k tomu, abych mohl získat vhodný popis chování motoru při různých podmínkách provozního režimu motoru a dále také, abych byl schopen srovnat výsledky simulace se skutečnými výsledky získanými z měření. Druhou část práce jsem zaměřil na optimalizaci parametru použitím vhodného algoritmu umělé inteligence. Úkolem tohoto algoritmu byla zpracovat naměřené hodnoty, jež byly získány v laboratoři při testování konkrétního motoru a podle určitých podmínek. Tyto hodnoty byly dále srovnávány s hodnotami vypočtenými po tak dlouhou dobu, dokud nebylo dosaženo funkčního minima, tedy minimálního rozdílu mezi naměřenými a vypočítanými hodnotami. Celý tento proces programu probíhal v závislosti na cílovou funkci.

9. LITERATURA

- [1] STRÁDAL, O. *Adaptace parametrů simulačního modelu asynchronního stroje*. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2008. 291 pages.
- [2] SAMEŠ, Miroslav. *Multikriteriální optimalizace asynchronního stroje*. Ostrava : VL B - TU , 2002. 15 pages.
- [3] GAJDÚŠEK, Pavel. *Přehled metod řízení asynchronního motoru*. Brno : FEKT , VUT, 2005 . 17 pages.
- [4] PAŘÍZEK, J. *Analýza a optimalizace energetických parametrů asynchronních strojů malého výkonu*. Brno: FEKT , VUT , 2011. 73 pages.
- [5] MATUCHA, Tomáš. *Nezávislý nízkonapěťový trakční asynchronní pohon*. Brno: FEKT , VUT , 2008. 93 pages.
- [6] BAJREKTAREVIČ, Edina. *Parameters identification of induction motor using a genetic algorithm*. Morgantown -West Virginia: West Virginia University ,2002. 112 pages.
- [7] LETTL, Jiří, RATZ , Robert. *Príspevek k vektorovému řízení s uvažováním nelinearity systému*. Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická, In *Sborník celostátní konference EPVE* 2006. 6 pages.
- [8] JANUŠKA, Jiří. *Implementace identifikačních algoritmů v signálovém procesoru*. Brno: FEKT , VUT, 2008. 73 pages.
- [9] SKALKA, Miroslav., SCHRIER, Luděk, JANDA, Marcel, ČESTMÍR, Ondrůšek . *Induction machine operation mode type effect onto the losses*. Brno: UVEE FEEC BUT, 2009. 8 pages. ISBN: 978-80-214-3975-7.
- [10] SKALA, Bohumil. *Simulace a měření na asynchronním stroji v přechodovém stavu*. Plzeň: FEL, ZČU 2006. 33 pages.
- [11] KUBÍN, Jiří. *Způsoby frekvenčního řízení asynchronního motoru z hlediska dynamiky*. Liberec: Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, 2006. 33 pages.
- [12] GARTNER, Jiří, HALÁMKA, Zdeněk. *Regulace rychlosti asynchronního stroje změnou napětí*. Praha: ČVUT FEL, 2000. 6 pages.
- [13] SKALKA, Miroslav., BOK, Roman., ČESTMÍR, Ondrůšek ., *Rozložení magnetického pole v elektrických strojích- ČÁST I*. Brno: FEKT , VUT, 2007. 13 pages. ISSN 1213-1539.
- [14] KADANÍK, Petr. *Řízení otáček asynchronního motoru bez použití čidla rychlosti*. Praha: ČVUT FEL, In *Sborník celostátní konference Brno* 1998. 6 pages.
- [15] ŠTĚPANEK, Libor. *Optimalizace účinnosti elektrického pohonu s AM pomocí fuzzy logiky*. Ostrava: FEL, VŠB , 2003. 6 pages.
- [16] SABAN, Mohammed. *Analýza elektrických strojů používání soustředěného parametrického modelu*. Brno: FEKT , VUT, 2008. 112 pages.
- [17] BERNAT, Petr. *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor*. Ostrava: FEL, VŠB-TU , 2006. 42 pages.
- [18] KLUÁČEK, J. *Návrh a analýza vysokorychlostního asynchronního motoru*. Brno : FEKT , VUT, 2011 . 73 pages.
- [19] ŠUBRT, J. *Elektrické regulační pohony II*. Brno: VUT, 1987. 180 pages. ISBN 55-582-87.

- [20] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing , a. s., 2003. 264 pages. ISBN:80-247:0507-9
- [21] RYDLO, Pavel. *Moderní regulované elektrické pohony a servopohony*. Liberec: Technická univerzita, 2006. 36 pages.
- [22] MATIJA, Sokola. *Vector control of induction machines using improved motor models*. Liverpool: John Moores university, 1998. 6 pages.
- [23] CHEE-Mun, Ong. *Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink*. West Lafayette: Purdue University, 1997. 688 pages. ISBN: 0-13-723785-5.
- [24] ZELINKA, Ivan. *Úvod do fraktální geometrie, buněčných automatů*. Zlín: Aplikovaná informatika, 1999. 189 pages.